

# 航天器解锁分离装置

杨建中 姜汉文

(中国空间技术研究院总体部)

**摘要** 介绍航天器常用的解锁分离装置,包括装置的分类、功能特点、适用范围等,有助于研制中正确选用解锁分离装置。

**关键词** 航天器 装置 解锁 分离

## 1 前言

由于运载火箭包络的限制及其振动环境的影响,在航天器发射飞行过程中许多部件都必须处于收拢、压紧状态,但当航天器到达预定轨道后这些部件再解锁、展开。解锁分离装置正是随着在轨展开及分离技术的发展逐渐发展起来的,它既可以实现航天器部件的压紧,或航天器舱体之间以及两个航天器之间的连接,又可以按规定的要求实现解锁或分离。被连接的对象一般称为目标体。不同航天器部件的质量及其对冲击环境敏感性的不同,需要不同的解锁分离装置来完成上述任务。另外,对于很多航天器如载人飞船、返回式卫星、深空探测器等,在飞行过程中需要不断抛掉完成任务的舱体或部件,这同样需要解锁分离装置。根据解锁分离装置解锁或分离动力的不同,通常把它分为火工装置和非火工装置两种类型<sup>[1]</sup>。

## 2 火工装置

火工装置是航天器上使用最早,也是最常用的解锁分离装置。目前许多产品已经标准化、系列化,因此可以根据不同的需要来选择使用。

### 2.1 爆炸螺栓<sup>[2]</sup>

爆炸螺栓是使用最早的解锁装置,可以通过爆炸螺栓方便地将目标体连接起来。图 1 所示为一种典型的爆炸螺栓。在螺栓体的侧壁上开有周向凹槽,称之为剪切槽,与螺栓体的其他部分相比,剪切槽处的强度大大降低。在目标体解锁分离时,起爆器通电工作,引爆主装药,在火药爆炸压力的作用下,螺栓体在剪切槽处断开,从而实现目标体的解锁。

上述爆炸螺栓断裂的同时,火药燃烧产生的有害气体释放到四周,所以,对周围环境的直接污染较

大,在室内试验时要特别注意通风,以免对试验人员造成伤害。

爆炸螺栓适用于连接载荷大、对冲击不敏感的航天器与运载火箭之间,以及航天器大型部件之间的连接与解锁。

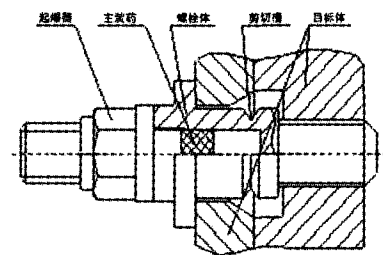


图 1 爆炸螺栓

### 2.2 钢球螺栓

钢球螺栓的基本组成见图 2,在连接时与普通螺栓使用相似,它通过螺栓体及套筒对钢球的挤压实现对目标体的连接。解锁时活塞在起爆器及主装药的爆炸压力作用下,向右移动,解除对钢球的约束,在挤压力的作用下,钢球向轴线方向滑落,套筒及螺栓体的约束被解除,实现目标体的解锁。

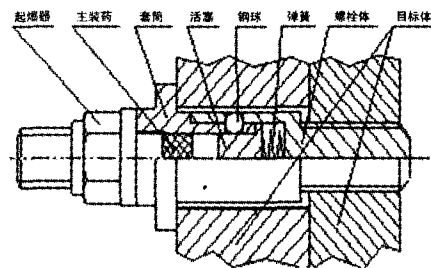


图 2 钢球螺栓

钢球螺栓的连接力较大,解锁力较小,体积和重量一般也比较小,特别适合小型部件的解锁分离。

### 2.3 解锁螺母

图 3 是一种典型的解锁螺母,其中的螺母由 3~

4瓣组成,在连接时它几乎与普通螺母一样,直接与对应的螺栓预紧即可。目标体解锁时,在起爆器和主装药的爆炸压力作用下,约束活塞左移,解除对多瓣螺母的径向约束,在螺栓轴向力的作用下,螺母瓣沿径向向外移动,解除与螺栓之间的连接,实现目标体的解锁。

为了防止在振动等环境中约束活塞误动作,通过压紧弹簧把约束活塞压紧到右端。

解锁螺母具有结构简单、性能可靠,而且易于与其他装置联合使用的特点。例如把解锁螺母与爆炸螺栓或钢球螺栓结合,可以大大提高解锁的可靠性。

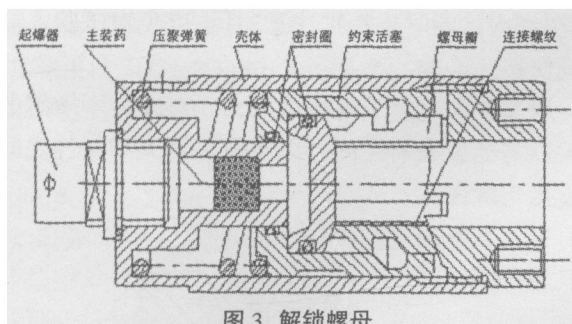


图3 解锁螺母

### 2.4 钢球锁

图4所示为一种目前广泛应用的钢球锁,它与钢球螺栓的工作原理相似。

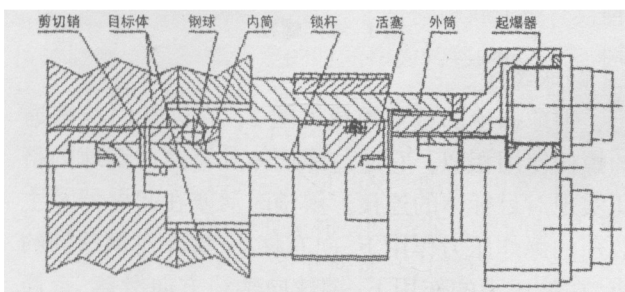


图4 钢球锁

在钢球锁外筒内表面上,有一个截面类似等腰梯形的环形槽。梯形槽能容纳半个钢球。在内筒相应的截面上,沿周向均匀分布3~4个径向孔,每个孔内安装一个钢球。这样,通过锁杆对钢球的约束作用,使内外筒成为一体。连接时为防止由于锁杆的移动而导致钢球锁误动作,通过剪切销把锁杆固定。

目标体解锁时,在起爆器和主装药的燃气压力作用下,活塞移动,推动锁杆剪断剪切销,锁杆移动到一定距离,解除对钢球的约束作用。在内外筒挤压力的作用下,钢球向中心轴线移动,解除对内外筒的约束,实现解锁。活塞继续移动,实现目标体的分离。

### 2.5 高承载锁(楔块锁)

由于钢球锁的承载力较小,当需要承受较大连

接载荷时,可以用平面接触的楔块代替点接触的钢球,这样就形成了一种高承载锁——楔块锁,如图5所示。它的工作原理及功能与钢球锁相似。

高承载锁的连接能力可达 $10^5$  N,用来实现大型结构部件与航天器主结构之间,或者航天器舱段之间的连接与分离。

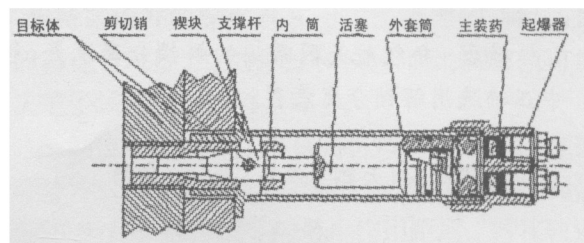


图5 高承载锁

### 2.6 高可靠锁(双啮合锁)

在上述火工装置中,解锁、分离的执行机构组件只有一套,一旦这套机构组件失效,将导致整个火工装置失效。为了避免这种事故发生,近年来又提出了高可靠锁的方案。高可靠锁的实质是几件基本火工装置的有机组合,固有可靠度高;同时与基本火工装置的直接组合相比,其体积、重量较小,因此受到了越来越多的关注。

图6所示为一种高可靠锁,由于它是通过枢轴的上下两个啮合面实现连接和解锁的,所以也称为双啮合锁。在连接时首先通过圆螺母的预紧实现两个夹块与枢轴的啮合,而后通过预紧球螺母实现目标体的连接。两个夹块分别通过一个小型爆炸螺栓与锁体实现连接。在正常解锁时,爆炸螺栓同时爆炸,两个夹块对枢轴的约束同时解除,枢轴被释放,目标体解锁。当只有一个爆炸螺栓工作时,即一个夹块的约束解除,在不对称约束力的作用下,枢轴通过球螺母产生倾斜,另一个夹块对枢轴的约束也随之解除,从而实现目标体的解锁,因此该锁的解锁可靠性大大提高。

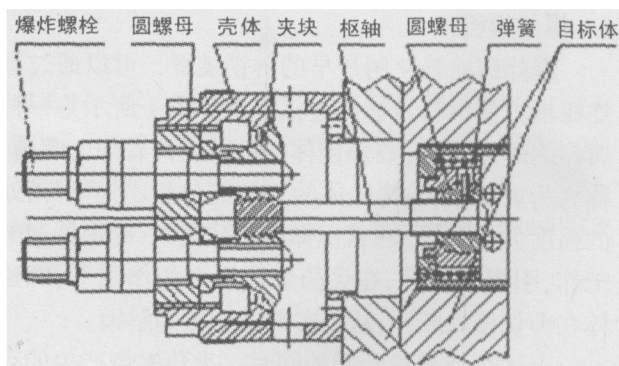


图6 双啮合锁

### 2.7 火工分离推杆

分离推杆的示意图见图 7,它只具有分离功能。一般地分离推杆与目标体中的一个固连,当目标体分离时,活塞在火药压力的作用下,剪断剪切销,推动目标体实现分离。

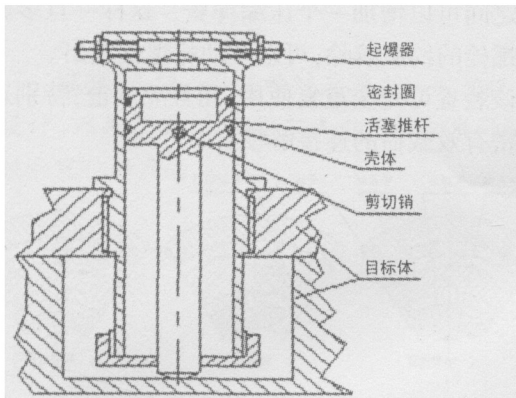


图 7 火工分离推杆

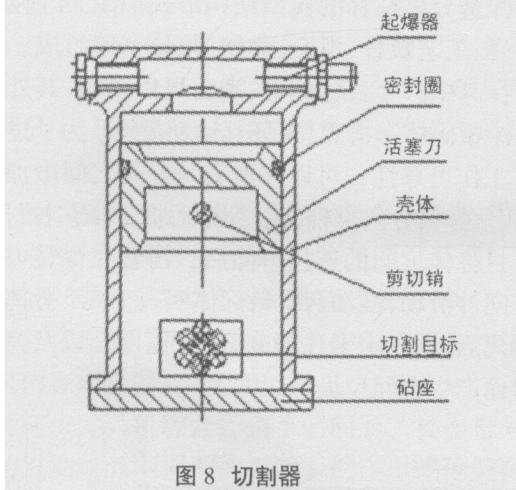


图 8 切割器

### 2.8 切割器

切割器是用来切断目标的,图 8 所示是一种典型的切割器<sup>[3]</sup>。工作时,活塞刀在火药爆炸压力的推动下切断目标。为了保证目标的顺利切断,一般应使活塞刀的硬度比切割目标的硬度以及砧座的硬度高 20(洛氏硬度)以上,另外砧座的硬度也要比切割目标的硬度高,以免在切割过程中,切割目标镶入砧座内。

### 2.9 拔销器

图 9 所示为一种典型的拔销器<sup>[4]</sup>。它通过销子把目标体固定。目标体解锁时,在火药压力的作用下,剪切销被剪断,销子右移,从而解除对目标体的约束。为了防止销子飞出,在壳体的右端设置了保护盖。

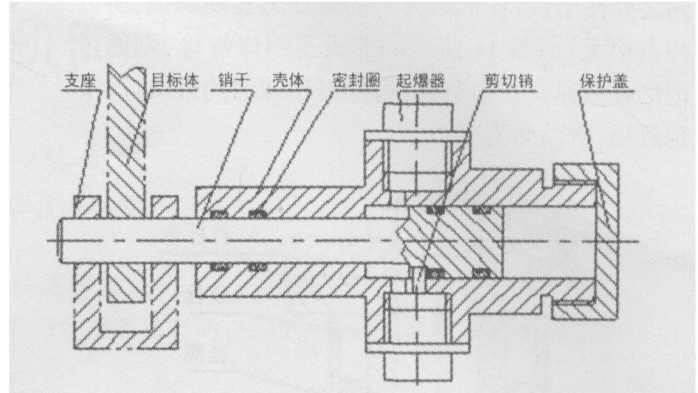


图 9 拔销器

## 3 非火工装置

与火工装置相比,非火工装置具有冲击小的显著特点,而且工作时一般不产生有害气体,因此不会因冲击而损伤有效载荷,也不会对有效载荷带来污染。另外,非火工装置还具有性能易于检测,试验成本低的特点,而且,产品在试验后还可以部分重复、甚至完全重复使用,因此非火工装置的应用研究受到了越来越多的关注。

### 3.1 断裂螺栓

断裂螺栓与爆炸螺栓的工作原理相似,二者的不同之处在于爆炸螺栓依靠火药的爆炸力使螺栓体断裂从而实现解锁,所以冲击很大;而断裂螺栓一般通过记忆合金驱动器的作用,使螺栓缓慢断裂,所以冲击很小。一种典型的断裂螺栓,如图 10 所示。

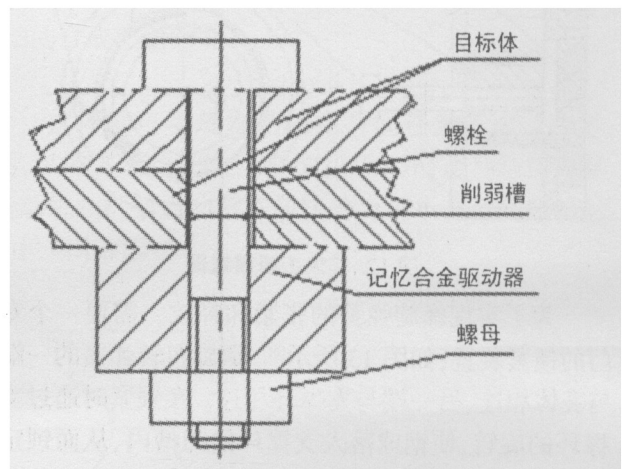


图 10 断裂螺栓

### 3.2 钢球螺栓

图 11 所示为一种非火工钢球螺栓<sup>[5]</sup>。非火工钢球螺栓与火工钢球螺栓的工作原理相似,二者的不

同之处在于:后者依靠火药的爆炸力实现解锁,所以冲击很大;而图 11 所示的非火工钢球螺栓,则通过记忆合金弹簧驱动滑套,解除对钢球的约束,进而实现解锁,所以冲击很小。

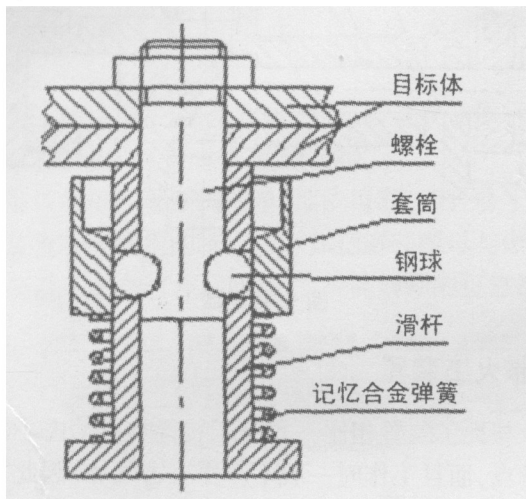


图 11 钢球螺栓

### 3.3 解锁螺母

非火工解锁螺母与火工解锁螺母的工作原理非常相似,也是通过由几瓣组成的螺母以及径向移动实现连接解锁的。图 12 是一种典型的非火工解锁螺母,它通过位于螺母外壁的螺旋扭转弹簧张紧和释放,实现弹簧直径的缩小和增大,进而实现螺母对螺栓的加载和卸载,即连接和解锁。

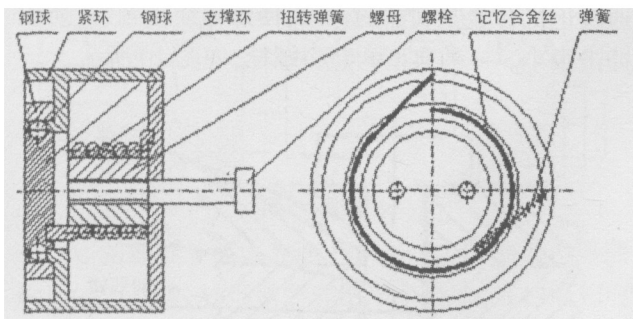


图 12 非火工解锁螺母

为了实现螺旋弹簧的张紧和释放,需要一个专门的锁紧装置,如图 13 所示<sup>[9]</sup>。螺旋扭转弹簧的一端与壳体相连,另一端与支撑环相连。在锁紧时通过支撑环的旋转,使钢球落入支撑环的凹槽内,从而锁定支撑环,张紧螺旋扭转弹簧。同时,锁紧环在锁簧的作用下,转过一个角度,这样进一步使支撑环可靠锁紧。与锁紧环相连的还有一根预张紧的记忆合金丝。当需要解锁时,记忆合金丝加热收缩,在收缩力的作用下,锁紧环相对壳体反向旋转到初始位置,在螺旋

扭转弹簧力的作用下,钢球落入锁紧环的凹槽内,支撑环解锁,从而失去对螺旋扭转弹簧的约束,螺旋扭转弹簧直径增大,解除对多瓣螺母的径向约束,在预紧力的作用下,螺母沿径向向外移动,实现解锁。为了进一步提高解锁的可靠性,在螺母的头部下端与壳体之间可以增加一个压缩弹簧,这样一旦多瓣螺母对螺栓的约束解除,可以主动将螺栓拔出。

该装置可完全重复使用,而且无冲击,特别适用于精密有效载荷的连接解锁。

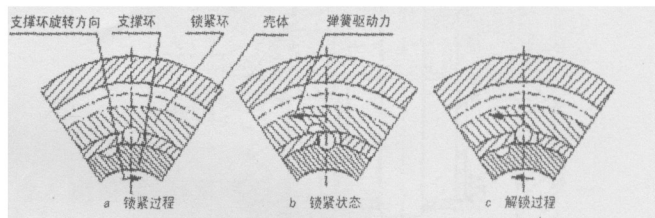


图 13 锁定装置

### 3.4 弹簧分离推杆

弹簧分离推杆的典型结构形式如图 14 所示,它由外壳、工艺拉杆、滑套、弹簧、限位卡等组成。外壳固定在其中一个目标体上,滑套可以滑动,其外表面均匀涂覆固体润滑膜,保证其运动灵活。为了提高工作可靠性,可以在滑套与外壳之间增加一个套筒<sup>[7]</sup>。弹簧分离推杆安装完毕后拆下工艺拉杆。当两个目标体之间的连接解除后,滑套在弹簧力的作用下向外滑动,推动两个目标体实现分离。分离到一定距离后,限位卡卡住滑套,避免因滑套以及弹簧的飞出而产生空间垃圾。

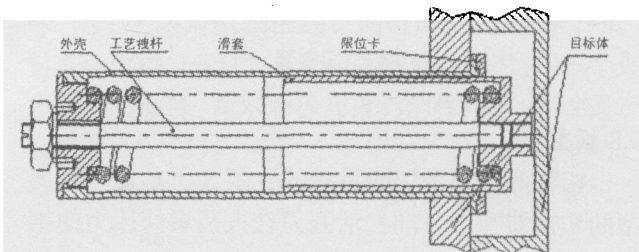


图 14 弹簧分离推杆的结构型式

弹簧分离推杆可以反复多次使用,分离力的大小可以在地面准确测得。在多个分离推杆成组使用时,可以通过地面筛选的方式,合理分配分离装置中各分离力的大小,而且可以通过调整初始压缩量,或分离行程来精确控制分离力或分离能量,以满足目标体特殊的质量特性或分离后的速度和角速度要求。其不足之处是:分离力始终作用在分离面之间,

(下转第 38 页)

发能力,即独立于特定程序的开发能力。

$C_{ib}$  的取值为 2000 至 20000。在美国软件开发机构中,正常范围为 5500 至 7500,最高达到 8650。

$C_{ie}$  的理论值为 0 至 20000,对美国软件开发机构,其实际下限在受到产品类型和其他诸多约束时约为 500。

式(9)中的  $f_i$  表示第  $i$  个环境系数。环境系数的类型,各开发机构不尽相同,其具体数值代表了其开

表 1 开发人员和机构能力度量

定义	具有高度的积极性和有经验的开发机构团队	具有较高或经验的开发机构团队	传统的开发机构	积极性较差或非关联机构	积极性缺乏和非关联机构
对成本的相对影响	0.71	0.86	1.00	1.19	1.46

发环境的水平,在公开刊物上无法获悉。表 1 是某个机构对环境系数之一的开发人员能力的评分度量。

综合式(8)和式(9)可以看出,Sage 模型属于典型的三阶模型。◇

参考文献:

[1]Wolverton, R.W. The Cost of Developing Large-Scale Software. IEEE Transactions on Computers June 1974: 615-636.  
 [2]Boehm, B.W. Software Engineering Economics. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc., 1981.  
 [3]Herd, J.R., J.N. Postak, We. E. Russell, and K.R. Stewart. Software Cost Estimation Study - Final Technical Report. Vol. I. RADC-TR-77-220. Rockville, MD: Doty Associates, Inc., June 1977.  
 [4]Jensen, R.W. Management Impact of Software Cost and Schedule. CrossTalk July, 1996:6.  
 [5]Galorath, Inc. SEER-SEM Users Manual. El Segundo, CA: Galorath Inc., Mar. 2001.  
 [6]Software Engineering, Inc. Sage User's Manual. Brigham City, UT: Software Engineering, Inc., 1995.

(上接第 14 页)

对密封性能存在潜在影响,因此对于分离前有密封要求的情况要慎重选用。

与火工分离推杆相比,弹簧分离推杆具有性能稳定、易于地面检测控制、工作时冲击小等优点,但体积和重量较大。

3.5 热刀

热刀是一种特殊的非火工解锁装置,通过张紧绳压紧目标体。在解锁时,热刀的刀体电热元件通电升温(达 1000℃),与电热元件紧密接触的张紧绳局部强度逐渐衰减,最后在预张力的作用下被拉断,目标体被释放。

热刀工作时的冲击很低,安全可靠。

4 结论

本文介绍的解锁分离装置,几乎都在航天器上实现了成功应用,有的已经非常成熟。在航天器研制过程中,充分了解、掌握这些解锁分离装置的特点,

对于解锁分离装置的正确选择,或新型解锁分离装置的方案确定,具有积极的指导和借鉴意义。◇

参考文献

[1]杨建中,姜汉文等.航天器用可解锁连接分离装置.航天器工程, 2003(1).  
 [2]袁家军.卫星结构设计与分析.北京:宇航出版社,2004.  
 [3]К.С.КОЛЕСНИКОВ, Динамик разделения ступеней летательных аппаратов,Москва МАШИНОСТРОЕНИЕ,1977.  
 [4]L. Bement, H. Multhaup, Determining Functional Reliability of Pyrotechnic Mechanical Device, 33rd AIAA/ASME/SAE Joint Propulsion Conference&Exhibit.1997.  
 [5]R. Gardi, M. Pastena, A Non- Pyrotechnic, SMA Based Release Mechanism for Separation System. 52nd International Astronautical Congress.  
 [6]J.Vazquez, J. I. Bueno, Non Explosive Low Shock Reusable 20 Hold-down Release Actuator,Proceedings of 9th European Space Mechanism and Tribology Symposium,2001.  
 [7]杨建中,姜汉文.保证神舟飞船机构可靠性的若干设计措施.载人航天,2006(4).