



中华人民共和国国家标准

GB/T 38194—2019

运载火箭操作性碎片减缓设计要求

Design requirements for mitigation of operational debris of launch vehicle

2019-10-18 发布

2020-05-01 实施

国家市场监督管理总局
中国国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 III

引言 IV

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 设计原则 2

5 设计要求 2

 5.1 航天器分离 2

 5.2 运载火箭末级钝化 3

 5.3 运载火箭末级离轨 4

 5.4 运载火箭自毁装置处置 4

6 验证项目与要求 4

 6.1 航天器分离 4

 6.2 运载火箭末级钝化 5

 6.3 运载火箭末级或上面级离轨 5

 6.4 运载火箭自毁装置处置 5

7 碎片减缓性能评估 5

 7.1 评估原则 5

 7.2 航天器分离 5

 7.3 运载火箭末级钝化 6

 7.4 运载火箭末级离轨 6

 7.5 运载火箭自毁装置处置 6

附录 A（资料性附录） 爆炸螺栓碎片减缓设计与验证 7



前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由全国宇航技术及其应用标准化技术委员会(SAC/TC 425)提出并归口。

本标准起草单位:北京宇航系统工程研究所。

本标准主要起草人:冯韶伟、陈思佳、陆凯、宋漪萍、何巍、姜沂、栾宇、张涛、徐倩、张然、卢松涛、谢萱。

引 言

在运载火箭入轨及后续飞行过程中,要经过航天器分离和末级钝化过程,有可能产生对航天器及空间环境有污染的气体或空间碎片,其中分离和钝化动作是操作性碎片的重要来源。

我国作为最早加入国际机构间空间碎片协调委员会(IADC)的成员国之一,于20世纪90年代就开展了空间碎片方面的研究,通过运载火箭总体技术研究、末级主动离轨技术研究、运载火箭设备钝化、碎片控制技术研究以及操作性碎片的减缓工程化实施,突破了相关关键技术并在运载火箭中得以验证和成功应用,对运载火箭操作性碎片的减缓设计具有丰富的研制和工程应用经验,现役型号运载火箭均将操作性碎片控制及任务后钝化操作纳入任务流程。

本标准将针对航天器分离、运载火箭末级钝化、运载火箭末级离轨、运载火箭自毁装置处置过程中,对于操作性碎片的减缓设计进行研究,通过深入的理论分析和必要的地面试验,对工作时可能对航天器造成污染、或可能产生操作性碎片的各个环节的设计工作均提供有效的指导。设计要求的建立,将使运载火箭入轨后的操作性碎片减缓设计变得规范、有序,使产品的系列化成为可能,从而为分离方案的设计、运载火箭末级钝化方案设计等方面提供设计准则,指导运载火箭操作性碎片的减缓设计。



运载火箭操作性碎片减缓设计要求

1 范围

本标准规定了运载火箭(或上面级)操作性碎片减缓技术的设计原则、设计要求、验证项目与要求,以及碎片减缓性能评估。

本标准适用于运载火箭从入轨到离轨的整个运行过程中操作性碎片减缓处理的设计工作。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 32295 运载火箭剩余推进剂排放设计要求

GB/T 32455 运载火箭术语

GB/T 34513 空间碎片减缓要求

3 术语和定义

GB/T 32455 和 GB/T 34513 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

运载火箭操作性碎片 operational debris of launch vehicle

运载火箭从入轨到在轨工作的整个正常生命期内,根据特定技术条件和设计要求,必然或有可能分离和释放到轨道上的物体,但不包括意外产生的碎片。

注 1: 操作性碎片不包括固体发动机的燃烧产物。

注 2: 如适配器、接头、保护装置和/或其他部件。

3.2

分离系统 separation system

接受控制系统发出的分离指令,按照分离时序完成规定的分离动作,实现某个分离事件预定的分离功能和要求的机构、结构和装置的总称。

3.3

连接解锁装置 combination and unlocking device

分离指令下达前、后分别实现保持和解除两分离体间的结构、电气系统连接约束的装置。

3.4

分离冲量装置 separation impulse device

提供分离所需的能量,使两分离体质心相对速度达到所需的相对分离速度的装置。

3.5

钝化 passivation

通过执行动作,消除或释放在轨运载火箭末级中存贮的、可能引发爆炸解体的能源的措施。

注: 包括将运载火箭末级或上面级中剩余推进剂和高压气体耗尽或排空,将蓄电池中荷电消除以及火工品的安全化处理等。

3.6

离轨 de-orbit

运载火箭末级完成既定飞行任务后,通过主动采取措施,离开航天器所在的工作轨道,再入大气层或进入符合国际规定的废弃轨道。

4 设计原则

除满足 GB/T 34513 中规定的避免故意释放碎片的要求外,还需遵循以下原则:

- a) 在运载火箭的末级在轨运行过程中,在完成所有工作内容后,例如分离、钝化、离轨等操作,不应产生危害航天器或影响空间环境的其他空间碎片;
- b) 对于单个航天器的发射,除航天器外,只能允许一个空间物体(如火箭末级、上面级等)进入轨道,对于多个航天器发射,除航天器外,最多不超过 2 个空间物体(如上面级、多航天器适配器等)进入轨道,搭载星不准许释放空间碎片;
- c) 在运载火箭与航天器、运载火箭与上面级、上面级与航天器之间分离解锁过程中,对连接解锁装置解锁产生的爆轰产物、结构碎片以及分离冲量装置的固体火箭喷口堵盖、分离弹簧等进行安全的、可靠的防护和碎片减缓措施,设计成释放后能系留住的方式,不能系留的,应设计相应容器将其包容,不产生对运载火箭及航天器飞行存在潜在威胁的空间碎片;
- d) 在保证主任务完成的基础上,运载火箭应对储能部件进行钝化处置,确保不影响航天器及运载火箭的安全性,确保不产生操作性碎片;
- e) 运载火箭在离轨过程中,不准许产生操作性碎片,不准许对在轨航天器产生不利影响;
- f) 操作性碎片的减缓措施应能满足运载火箭对接、力学环境条件、重量指标、操作安装、可靠性及安全性等要求;
- g) 运载火箭末级粘贴的标识以及用于防护的结构、装置、涂层等应确保在在轨运行环境条件下不脱落;
- h) 结合我国航天工程实际进行设计,保障实用性强,兼顾通用性。

5 设计要求

5.1 航天器分离

5.1.1 分离方式选择

根据航天器与运载火箭之间、上面级与运载火箭之间、航天器与上面级之间航天器的布局、支撑方式、结构形式、分离连接解锁装置、分离冲量装置和分离时序方案,确定分离方式,如串联、并联等。分离方式选择要求如下:

- a) 原则上选择在正常工作时不释放空间碎片的分离方式;
- b) 多航天器分离的方式应优先采用并联分离方式设计,其次采用串并联结合的分离方式,不应采用相互不能支撑的串联分离方式;
- c) 对于串联分离方式,优先采用上、下航天器相互固连的方式,若多航天器之间采用支撑结构,则支撑结构应优先采用弹射拔罩的分离方式;
- d) 对于采用旋转分离的分离方式,起旋装置不能同运载火箭分离。

5.1.2 分离连接解锁装置的设计

分离连接解锁装置的设计要求如下:

- a) 解锁动作不应产生操作性碎片,动作包络范围应在航天器允许区域之内,不应影响最小分离间隙;
- b) 当解锁装置选用爆炸螺栓、低冲击分离装置时,应采用收集装置,收集爆炸螺栓工作后产生的爆炸螺栓头等自由体,优先选用无污染爆炸螺栓,爆炸螺栓操作性碎片减缓措施参见附录 A;
- c) 对于线性分离解锁装置,应优先选用齐普类线性装置,应保证火药燃烧产物封闭在炸药管内,不释放到空间;
- d) 对于包带解锁装置,在释放时应保证无碎片、烟雾等污染物出现,一般采用拉簧将包带系留在航天器支架上;
- e) 对于非火工的解锁装置,例如气动解锁、立方星的电磁解锁等,在解锁过程中不应产生操作性碎片;对于火工解锁装置,应优先采用无污染的火工装置,在火工装置工作过程中,不应产生预计以外的碎片或分离物;
- f) 应确保分离过程中不发生结构完整性破坏,如爆炸螺栓盒的破裂,包带螺钉断裂、包带 V 形卡块脱离等。

5.1.3 分离冲量装置设计

分离冲量装置设计要求如下:

- a) 分离冲量装置应设计系留装置,在完成动作后分离冲量装置及其附件均应留在箭体上;
- b) 分离冲量装置优先采用压缩弹簧等不产生空间碎片的冲量装置;
- c) 如果采用固体或液体火箭作为分离冲量装置,应开展火箭羽流分析,分析力、热环境对航天器的污染、对相关系统的影响及由此产生的空间碎片。

5.2 运载火箭末级钝化

5.2.1 剩余推进剂排放

剩余推进剂排放要求如下:

- a) 运载火箭末级应设置排放装置,不应存在封闭的压力腔,运载火箭剩余推进剂的排放设计要求见 GB/T 32295;
- b) 设计过程中应明确需要监测的贮箱压力、排气管压力等遥测参数;
- c) 排放动作开始时机一般应选在火箭与航天器之间距离超过 1 000 m 之后,在推进剂排放执行过程中,不准许在轨产生操作性碎片,或影响在轨航天器正常飞行。

5.2.2 剩余高压气体排放

运载火箭末级所携带的增补压气瓶、控制气瓶、吹除气瓶等装置,需将其剩余高压气体排放,确保航天器安全在轨飞行。剩余高压气体排放要求如下:

- a) 运载火箭剩余高压气体排放动作执行过程中,不产生操作性碎片;
- b) 运载火箭剩余高压气体排放时,通过分离远场分析,在运载火箭与航天器之间拉开一定的安全距离之后,确定开始钝化的时序,确保高压气体排放过程对航天器无影响;
- c) 对于运载火箭气瓶装置,一般应设置专用放气通路,通过放气控制阀、减压阀进行剩余气体排放,或通过工作通道上的阀门将剩余气体排出;对于通过贮箱排放的,需复核气瓶放气过程的安全性,必要时可以考虑采用闭式排放方案对气瓶放气过程进行控制;
- d) 原则上贮箱和气瓶应设置排放装置,不能排放的,贮箱和气瓶应具有足够的安全余量,保证在经受太阳辐射加热后所积累的压力不会导致结构爆炸;
- e) 对于采用共底结构的贮箱进行排放处置时,应保持共底两侧合理的压差,以保证排放过程的

安全；

- f) 运载火箭应合理设计排放装置,保证排放过程中运载火箭本体的姿态稳定。

5.2.3 蓄电池钝化

在运载火箭的末级完成所有工作内容后,将电池对箭上负载的供电电路切断,启动钝化电路,安全可靠地将电池剩余电量耗尽,当剩余电量达到钝化要求时执行切断动作,将钝化电路切断。蓄电池钝化设计要求如下:

- a) 蓄电池应设置带一定压力阈值的单向阀门,或安装吸附和消耗气体的材料和结构,实现内部气压积累控制,确保内部压力处于安全范围内;
- b) 在运载火箭任务完成后,需要通过蓄电池外部电路主动切断蓄电池的负载电路,并确保接通和断开接点的允许通过电流具有一定的安全余量;
- c) 在运载火箭所有任务和工作完成后,通过某一控制信号启动蓄电池钝化装置工作,在一定的放电电流安全范围内,电压平稳下降直至蓄电池内剩余电量的耗尽,放电过程中应防止电池内部过热。

5.3 运载火箭末级离轨

运载火箭末级或上面级的离轨要求如下:

- a) 运载火箭末级或上面级在发射任务结束后应远离低地球轨道(LEO)和地球静止轨道(GEO)保护区,处置要求应满足 GB/T 34513 的规定;
- b) 在运载火箭方案设计阶段应将末级离轨设计方案列入规划,并在研制过程中对离轨方案进行详细设计和效果评估,充分考虑远场及近场的分离安全性;
- c) 通过仿真分析,在确保不会污染、干扰或碰撞已入轨航天器的前提下,尽量增大运载火箭末级或上面级与航天器再次接近的相对距离;
- d) 运载火箭末级或上面级可采用末级发动机再次点火、姿控发动机工作、剩余推进剂排放、高压气体排放、固体火箭发动机点火等方式或几种方式的组合实现主动离轨,在主动离轨过程中,不准许产生操作性碎片,其中由于固体火箭发动机容易产生燃烧颗粒物,不推荐使用;
- e) 运载火箭末级或上面级可借助太阳帆、膨胀伞、电动绳系等自身增设装置实现被动离轨,在被动离轨过程中,不准许产生操作性碎片,同时应避免增设装备与其他在轨物体发生碰撞;
- f) 对于绳系系统的被动离轨,应分别开展完整系统和分离系统的潜在危害性分析,确保对其他在轨运行空间系统的危害性降低到可接受的程度。

5.4 运载火箭自毁装置处置



运载火箭自毁装置的处置要求如下:

- a) 对于运载火箭末级装备自毁装置的,自毁装置在整个任务周期内应始终保持在点火温度以下,且留有足够的安全余量,以保证在受太阳加热温度上升的情况下不致起爆;
- b) 自毁装置的点火电路在末级完成任务后,应满足环境使用要求,若安全余量不足,则应切断自毁装置的点火电路。

6 验证项目与要求

6.1 航天器分离

航天器分离验证项目与要求如下:

- a) 开展分离连接解锁装置结构完整性破坏的理论分析和静力试验,确保在设计载荷下结构保持

完整、无多余物,不产生操作性碎片;

- b) 开展分离连接解锁装置(包含防护装置)的解锁试验,通过无死角的多角度视频观测,不产生操作性碎片;
- c) 在 b)的基础上,按规定进行系统级航天器分离试验,通过无死角的多角度视频观测,不产生操作性碎片。

6.2 运载火箭末级钝化

运载火箭末级钝化验证项目与要求如下:

- a) 剩余推进剂的排放和高压气瓶钝化方案、启动时序等主要通过仿真验证,确保动作执行过程中不产生操作性碎片;
- b) 在条件允许的情况下,应开展高压气体排放地面验证试验,确定气体排放时序、贮箱压力下降规律等;
- c) 蓄电池需开展电池放电试验,视条件开展热真空试验,蓄电池钝化装置的系统联试需在箭上供电状态下进行。

6.3 运载火箭末级或上面级离轨

运载火箭末级或上面级离轨验证项目与要求如下:

- a) 对于采用固体或液体火箭作为主动离轨能源的运载火箭,应开展燃烧产物污染和羽流流场分析和主动离轨仿真分析;
- b) 对于被动离轨的运载火箭末级,应开展离轨有效性仿真分析,确认仿真模型的正确性,对于有自身增设装置的,还需要开展装置动作试验,确保动作过程中无碎片。

6.4 运载火箭自毁装置处置

运载火箭自毁装置处置验证项目与要求如下:

- a) 运载火箭末级自毁装置及点火电路应开展空间综合环境适应性分析或试验,包括空间环境、力学振动环境等,确保自毁装置和点火电路结构完好,不发生破坏;
- b) 自毁装置及点火电路应开展电磁兼容试验、射频干扰试验等,避免电源波动对数字电路电源、电平信号产生干扰,或导致自毁装置误爆。

7 碎片减缓性能评估

7.1 评估原则

运载火箭末级的碎片减缓性能应进行评估,评估的主要方式为通过地基、天基遥测系统和观测系统数据判读。运载火箭的分离、钝化阶段的关键动作,例如阀门打开、负载连接等应保证可观测。

7.2 航天器分离

航天器分离的碎片减缓性能评估方法如下:

- a) 开展包带、爆炸螺栓盒、线性分离装置等分离解锁装置以及分离弹簧、固体火箭等分离冲量装置结构完整性破坏的理论分析预示及地面试验,确保不产生空间碎片;
- b) 在航天器分离后,应按照标称状态和极限偏差状态开展分离近场、远场安全性分析,确保各分离体分离后碰撞距离满足要求,且后续不发生任何碰撞。

7.3 运载火箭末级钝化

运载火箭末级钝化的碎片减缓性能评估方法如下：

- a) 根据贮箱压力、排气管压力等遥测数据判断,当贮箱压力低于 0.08 MPa(绝压)视为剩余推进剂排放完毕,贮箱压力和排气口压力均低于 0.01 MPa(绝压)视为剩余推进剂完全排放,共底类贮箱应保证零压差;
- b) 通过地面观测、遥测系统,对火箭末级箭体的钝化状态进行跟踪观测,作为火箭末级有效钝化的旁证,确保末级箭体没有因钝化不充分而导致在轨解体。

7.4 运载火箭末级离轨

运载火箭末级离轨的碎片减缓性能评估方法如下：

根据地面、天基观测系统或遥测数据,对离轨后的火箭运行状态进行长期跟踪观测,作为火箭末级离轨效果的旁证。

7.5 运载火箭自毁装置处置

运载火箭自毁装置的碎片减缓性能评估方法如下：

- a) 运载火箭自毁装置在空间力、热、电磁等环境条件下不发生破坏,不误爆,不产生操作性碎片;
- b) 根据地面观测系统,对运载火箭自毁装置处置后的运行状态进行跟踪观测,作为自毁装置是否有效处置的旁证。

附 录 A
(资料性附录)

爆炸螺栓碎片减缓设计与验证

A.1 爆炸螺栓盒盒盖设计

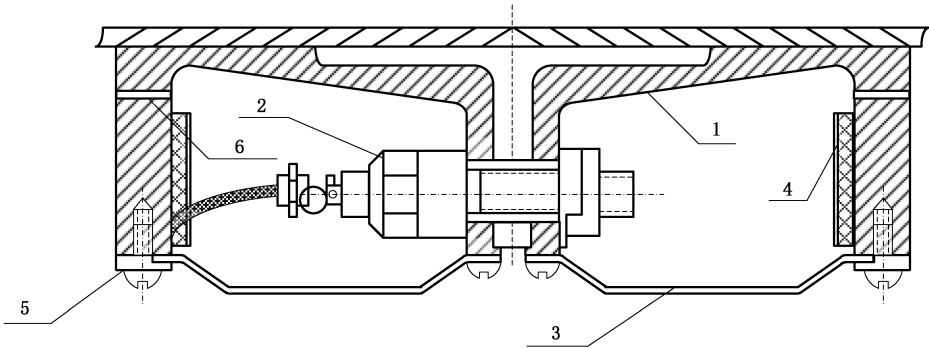
典型的爆炸螺栓盒盒盖结构示意图如图 A.1 所示。爆炸螺栓盒盒盖设计要求如下：

- a) 爆炸螺栓盒盒盖推荐采用延展性好的钢或铝材,优选断后伸长率为 12%~17%的硬质金属材料,确保盒盖在承受爆炸螺栓解锁产生的冲击时结构不破坏、不产生碎片,并对螺栓解锁碎片具有防护功能;
- b) 为保证盒盖结构的完整性宜采用能够降载吸能的结构形式,盒盖外形推荐采用外凸的非平板结构,盒盖厚度不小于 2 mm。

A.2 爆炸螺栓盒盒体设计

典型爆炸螺栓盒盒体结构示意图如图 A.1 所示。爆炸螺栓盒盒体设计要求如下：

- a) 爆炸螺栓盒盒体推荐采用延展性好的钢或铝材,优选断后伸长率为 12%~17%、抗拉强度不小于 390 MPa 的硬质金属材料,确保盒体在承受爆炸螺栓解锁产生的冲击时不产生碎片,并对螺栓解锁碎片具有防护功能;
- b) 为保证盒体整体变形与盒盖变形相协调,满足强度和刚度的要求,充分吸收爆炸螺栓解锁过程中产生的能量,在满足部段连接载荷、连接螺钉安装点条件下,确保强度、刚度满足设计要求,可适当减薄螺栓盒盒体侧壁的厚度;
- c) 盒体宜设计泄压孔。



说明：

- 1——爆炸螺栓盒盒体；
- 2——爆炸螺栓；
- 3——爆炸螺栓盒盒盖；
- 4——缓冲垫；
- 5——连接螺钉；
- 6——泄压孔。

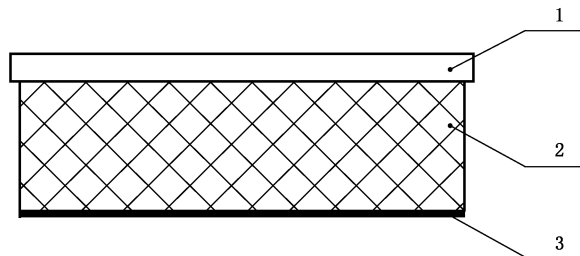
图 A.1 典型爆炸螺栓盒盒体结构示意图

A.3 缓冲垫设计

A.3.1 金属缓冲垫

金属缓冲垫结构示意图如图 A.2 所示,包括第一金属层、弹性缓冲层和第二金属层三部分。设计要求如下:

- a) 为减缓爆炸螺栓解锁后对盒体的冲击,在盒体内壁增加金属缓冲垫,缓冲垫与盒体之间采用螺栓方式连接;
- b) 金属缓冲垫推荐采用复合夹层结构,金属缓冲垫与爆炸螺栓分离后的部件碰撞接触的第一金属层推荐采用弹性模量为 195 GPa~215 GPa,冲击吸收功(AKU)为 36 J~42 J,HRC 36~42 的硬质金属材料,例如 30CrMnSiA,厚度不小于 3 mm,以保证结构强度和刚度满足要求;与盒体内壁连接的第二金属层推荐采用冲击吸收功(AKU)为 38 J~42 J 的金属材质,例如不锈钢,厚度不小于 1 mm;中间弹性缓冲层采用金属橡胶材料,推荐采用弹性模量为 190 GPa~210 GPa、丝径为 0.2 mm~0.4 mm 的金属丝网,成型后非受载状态下丝网密度为 $2\ 350\text{ kg/m}^3 \sim 3\ 250\text{ kg/m}^3$,厚度不小于 20 mm;
- c) 金属缓冲垫设计需满足环境使用要求,确保飞行过程中在力、热环境条件下不发生破损、分解。



说明:

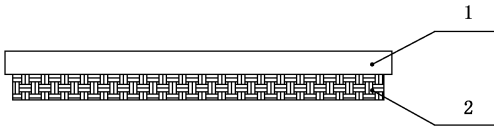
- 1——第一金属层;
- 2——弹性缓冲层;
- 3——第二金属层。

图 A.2 金属缓冲垫结构示意图

A.3.2 非金属缓冲垫

非金属缓冲垫结构示意图如图 A.3 所示,包括第一金属层和弹性缓冲层两部分。设计要求如下:

- a) 为减缓爆炸螺栓解锁后对盒体的冲击,在盒体内壁增加非金属缓冲垫,缓冲垫与盒体之间采用螺栓方式连接;
- b) 非金属缓冲垫推荐采用复合结构,非金属缓冲垫与爆炸螺栓分离后的部件碰撞接触的第一金属层推荐采用弹性模量为 195 GPa~215 GPa、冲击吸收功(AKU)为 36 J~42 J,厚度不小于 4 mm,以保证结构强度和刚度满足要求;与盒体内壁连接的弹性缓冲层推荐采用橡胶板,厚度不小于 3 mm;
- c) 非金属缓冲垫设计需满足环境使用要求,确保飞行过程中在力、热环境条件下不发生破损、分解。



说明：
1——第一金属层；
2——弹性缓冲层。

图 A.3 非金属缓冲垫结构示意图

A.4 连接螺钉设计

连接螺钉设计要求如下：

- a) 盒盖与盒体连接螺钉优先采用不锈钢钢材料的 M6 及以上的螺钉标准件，螺钉与盒盖连接推荐采用平垫、弹簧垫，也可按有关标准规定采用其他防松措施；
- b) 为确保爆炸螺栓解锁过程中，在爆炸产生的气体和爆炸螺栓分离部件作用下螺钉的连接强度，宜均匀、合理地布置爆炸螺栓盒上的螺钉。

A.5 试验验证项目

试验验证项目及如下：

- a) 开展爆炸螺栓(含爆炸螺栓盒钝化装置)发火试验，通过多角度视频观测，确保无死角，不向爆炸螺栓盒体外产生碎片；
- b) 爆炸螺栓盒盒体、盒盖、连接螺钉结构目视完整，结构不发生局部破裂；
- c) 爆炸螺栓解锁过程中产生的碎片、分离体均封闭在爆炸螺栓盒内部。