

航天飞机地面返场操作技术研究

康开华

(北京航天长征科技信息研究所, 北京 100076)



摘要: 介绍了航天飞机最初设计的返场操作方案和服役后实际执行的返场操作, 详细介绍了轨道器从着陆于跑道到轨道器处理厂房, 而后再次运抵发射台, 直至在发射前所执行的地面维护操作。基于航天飞机的返场操作, 提出未来研制天地往返可重复使用运载器在地面维护操作方面的建议。

关键词: 轨道器; 外贮箱; 固体助推器; 地面维护; 返场操作

Shuttle Ground Turnaround Processing Technology

Kang Kaihua

(Beijing Institute of Aerospace Long March Scientific and Technical Information, Beijing 100076)

Abstract: The original turnaround processing conception and the real operation of shuttle were introduced in the paper. The ground maintenance of orbiter was described in details from its landing to relaunching. Based on the turnaround operation of shuttle, the suggestions on ground maintenance were given for the development of the future reusable launch vehicle.

Key words: orbiter; external tank; solid rocket boosters; ground maintenance; turnaround operation

1 引言

美国国家航空航天局(NASA)研制的航天飞机是世界上第一种往返于地面和宇宙空间的部分重复使用的航天运载器。它在发射场垂直起飞, 上升过程中抛掷工作完毕的固体助推器壳体和外贮箱。助推器在海上回收、整修后供再次使用, 外贮箱不回收。轨道器执行任务后再返回, 水平着陆。原设计轨道器的维护周期为 160h, 即 2 周后可执行下一次任务。然而航天飞机的一大突出弊端便是维护操作时间过长(最少 4 个月), 成本过高(2000 年后每次发射的检测和维护费用都在 5 亿美元以上), 远远达不到美国当初设计航天飞机时所设想的大幅度降低发射成本以取代一次性使用运载器的目的。挑战者号和哥伦比亚号航天飞机的重大事故均与返回后地面维护操作失误有关, 因而航天飞机退役后, 世界各航天强国在开展重复使用航天运载器研制时, 便将重复使用运载器的地面维护

操作视为是重要的研究课题, 在运载器方案设计之初就予以高度重视。

2 航天飞机设计的地面返场操作

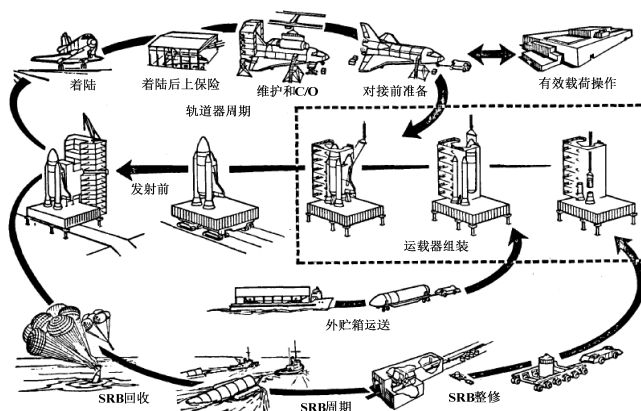


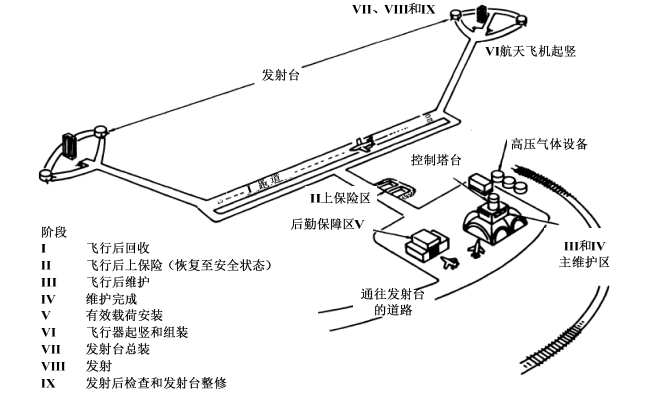
图 1 轨道器地面返场操作

作者简介: 康开华(1977), 高级工程师, 情报研究专业; 研究方向: 航天运输技术情报研究。

收稿日期: 2017-12-15

航天飞机系统设计的返场为从轨道器着陆到执行下一次任务起飞，返场时间为 14d。基于 2 班、一周 5d 的工作日，执行地面操作将在 160h 的工作时间以内。图 1 示出了轨道器、外贮箱、固体助推器的地面返场操作及其地面系统间的相互关系。航天飞机采用了“航空公司”返场操作的基本方法^[1]。

2.1 返场操作方案



基于泛美世界航空公司（PAA）的分析，航天飞机的地面维护操作划分为 9 个阶段。图 2 示出了各维护阶段及其操作位置。

在 PAA 的分析中，将操作阶段分为 2 大类：阶段 I、II、V、VI、VII、VIII 和 IX 阶段认定为是地面操作阶段，III 和 IV 为维护阶段。

2.2 返场操作阶段

为了分析返场操作，将第三阶段（飞行后维护）和第四阶段（维护完成）整合。虽然第九阶段与航天飞机的地面维护没有直接的联系，但它仍包含在返场周期分析中，因为需要分析本次任务对发射台的影响是否会对下一次发射任务造成影响。表 1 和表 2 列出了返场操作的各阶段和每一阶段需要完成的任务，以及完成任务的时间。表 2 还列出了完成任务所需的人工时间^[2]。

表 1 返场周期（地面操作）

阶段、任务和描述	任务时间/h
第一阶段——飞行后回收	
任务 1——着陆与回收。	0.5
任务 2——地勤人员通过安装齿轮锁销和轮挡阻止轮子滑行、将外部火工品开关置于安全位置并安装机组活动舷梯、连接拖曳装置的牵引绳索。机组人员取下飞行磁带和日志，并走下轨道器。移走轮挡，轨道器牵引至固定区并定位以准备执行冷却和净化操作。	0.5
第二阶段——飞行后安全	
任务 1——执行冷却、排放、净化和拆卸火工品操作。执行防热系统（TPS）冷却和液氢贮箱排放操作，并连接气体净化管路。冷却后，在氢排放去采样显示的排放处于安全等级时拆卸火工品。	7.0
任务 2——利用专用操作设备卸下轨道器中的货物。	3.0
第三阶段和第四阶段——见表 2	
第五阶段——有效载荷安装	
任务 1——轨道器从维护区牵引至后勤厂房的加注区，定位并执行加注操作。	1.0
任务 2——利用专用处理设备将有效载荷装入轨道器。	4.0
任务 3——检查并确保轨道器货舱的安全。	0.5
任务 4——牵引轨道器至起竖区定位并执行起竖操作。	1.0
第六阶段——航天飞机系统起竖与集成	
任务 1——轨道器、外贮箱和固体助推器牵引至发射台区，定位并执行机械对接操作。	12.0
任务 2——轨道器、外贮箱和固体助推器将通过机械方式安装在发射装置上。实现正确的排列、连接分离硬件并安装火工品。	4.0
任务 3——加注与排放阀门的连接和泄漏检查。	6.0
任务 4——连接轨道器内部和轨道器与发射装置的电气接口。检查飞行器分离离子系统中的电启动的爆炸螺栓，但并不通电。	4.0
任务 5——综合航天飞行系统检查，自动检测所有飞行器系统的操作是否正常。	8.0
第七阶段——发射台集成	
任务 1——通过机械方式将发射装置和发射台相连接。	2.0
任务 2——连接发射装置设备的电气、推进剂和气动液压供应管路。	10.0
任务 3——发射装置和发射控制兼容性试验。	4.0
任务 4——所有飞行器、发射装置、设备连接接头的低温泄漏检查。	4.0
第八阶段——发射	
任务 1——发射倒计时。机组进入轨道器并利用机载检查设备执行飞行前检查。火工品接电。加注推进剂和持续补给操作。机组将执行最后的飞行前检查。发动机点火并检查发动机性能。航天飞机起飞。	6.0

续表

阶段、任务和描述	任务时间/h
任务 2—火工品断电，取消安全控制。航天飞机系统处于待命状态并返回至发射倒计时，重新执行第八阶段任务 1 操作。	(6.0) *
第九阶段——发射后检查和发射台整修	
任务 1—发射台检查。	(4.0) *
任务 2—发射台整修。	(8.0) *
总计	77.5
注：*不包含在返场维护操作中	

表 2 返场周期维护（第三阶段——飞行后维护和第四阶段——维护完成）

任务和描述		任务时间/h	人工时间/ET
任务 1—在安全区接收轨道器并在完成交接检查单的填写后将其运往主维护区（MSA）。		0.6	1.7
任务 2—MSA 接收轨道器并将其安置在维护厂房中准备执行维护作业。		1.4	13.2
任务 3—打开检修门与盖板并拆卸 TPS，对结构、内部舱室、组件、设备、系统执行例行检查和维护。		7.0	41.7
任务 4—轨道器的整个外部和特定的内部舱室执行外观检验并按要求执行校正操作。轨道器检查的区域有：		15.8	189.2
外部	E (t)		
机身，包括可见的主结构、轨道器对接点、TPS、风挡和舱门；	49.2		
前起落架，连接结构、舱门和舱室；	2.2		
返回动力装置，发动机罩、发动机附属结构、舱门、发动机舱室；	51.3		
机翼、襟翼与阻流板和机翼连接结构、操作机构、机翼门、井；	26.1		
主起落架，附属结构、舱门和舱室；	9.3		
尾部，包括 TPS、可见的主结构、安定翼及其防热系统，控制面、附属结构；	11.8		
安定翼和火箭发动机（连接结构）；	8.4		
火箭发动机。	4.3		
内部	E (t)		
控制舱，包括设备检查；	7.9		
设备舱和通道；	8.0		
货舱和辅助箱。	10.7		
总计	189.2		
任务 5—执行非例行的操作，完成简化、分析飞行性能监测数据。		19.4	381.2
任务 6—执行例行维护，轨道器补充一次性使用部件和消耗品，如气体、食物（如果计划 24 小时后执行发射任务）和电池组等。净化轨道器各舱室，对预定的区域施加润滑剂。		7.8	62.0
任务 7—按要求检查系统，如液压系统压力和泄漏检查、飞行控制响应检查、ACS 检查、航电设备操作检查、火箭发动机故障系统检查、发动机涡轮泵密封泄漏和扭矩检查。		7.0	41.6
任务 8—关闭检修口和盖板，并安装拆卸下的防热系统部件。		7.0	42.0
任务 9—撤除千斤顶和工作台，准备将轨道器牵引出维护区。		1.3	13.2
任务 10—将轨道器运抵发动机试车区并执行发动机试车。		1.1	3.2
任务 11—执行最后的轨道器签字放行和鉴定，地面操作人员准备执行轨道飞行器的下一阶段地面操作。		0.5	0.5
总计		68.9	789.5

由于航天飞机兼具飞机和航天运载器二者的特征，因而 NASA 研制了返场所需的专用设备，并将它们应用于航天飞机地面维护的各阶段。在返场分析中，轨道器返场操作用时 146.4h。该数据包含了预期的非例行的维护操作时间，不包括轨道器执行较大的维修操作，但可执行组件级的维修操作。

3 航天飞机实际的返场操作

作为航天飞机的主着陆场和发射场，肯尼迪航天中心（KSC）承担了航天飞机大部分的发射和返场任务，拥有轨道器着陆跑道、轨道器处理厂房（OPF）、固体助推器处理厂房、飞行器总装厂房（VAB）、发射台 39A 和 39B，有效载荷处理厂房和自燃推进剂处理厂房等完备的航天飞机系统地面操作设施^[3]。

3.1 着陆跑道操作

轨道器着陆后，安全评估小组利用监测器获得其周围的蒸汽等级读数，测试可能的爆炸或有毒气体，

如氢气、肼、一甲基肼、二氧化氮或氨气等。而后执行轨道器的净化和冷却操作(如图3所示)。如果证实无氢气,操作将继续执行。如果检测存在氢气,航天飞机机组将立刻撤离,工作人员将清理现场,并关闭轨道器的应急电源。



图3 脐带连接轨道器执行残留的爆炸和有毒烟气的净化

轨道器的净化操作通常是在其着陆静止于跑道上45~60min后开始执行。当确定轨道器所处位置及其周围处于安全状态时,机组人员离开轨道器,通常在轨道器着陆1h后执行该项操作。在机组离开轨道器后,轨道器地面冷却仍在进行时,飞行期间执行轨道器控制的约翰逊航天中心将其所承担的职责移交给KSC中心。KSC中心的支持人员准备执行轨道器的地面牵引操作,牵引操作通常在轨道器着陆4h内执行,并于6h内完成。

3.2 轨道器处理厂房(OPF)操作

OPF的结构设计类似于复杂的飞机库,图4示出了牵引进入OPF中的轨道器。在此轨道器将执行多项飞行后修整和维护操作(其间将拆卸有效载荷和安装下一次任务所需的设备),检验和维护步骤包括:

a. 净化轨道器的主发动机,去除液氢和液氧燃烧生成的水气;

b. 打开有效载荷舱门并安装检修装置,以支持有效载荷操作并确保操作安全;

c. 排空燃料电池低温贮箱中的剩余反应物,环境控制和生命支持系统排出高压气体;

d. 轨道器卸载不可储存的消耗品并清除废品。排空饮用水系统、向蒸发器喷水并拆除过滤器,以及拆卸辅助电源装置;

e. 拆除发动机的隔热层和后部检修门,安装主发动机的框架自锁和发动机盖板罩。拆卸3台发动机用于执行独立的检查和维护以准备执行未来的飞行任务;

f. 当需要时,拆卸轨道机动系统(OMS)和反作

用控制系统(RCS)吊舱,以及前部RCS,送往KSC中心的自燃物维护厂房执行维护。



图4 轨道器进入轨道器处理厂房进行处理以执行下一次飞行任务

此外,在OPF厂房内还要执行轨道器的外观检查,涉及TPS、选定的结构元件、起落架和其他系统,以确定它们是否在任务执行期间受到损伤。在航天飞机执行下一次任务之前,隔热系统的任何损伤都必须进行修理。轨道器外部约25000块隔热瓦和隔热毡,以及内部约6000块热控毡的大部分维护作业都是在OPF厂房中进行。而在OPF厂房内执行的飞行前例行维护则包括:重新装配轨道器系统用以执行例行维护、更换部件,并安装新任务的飞行套件和有效载荷。装载可消耗的流体和气体,并维护辅助电源装置和润滑系统。OPF厂房内轨道器处理的最后步骤是称量轨道器的重量,以确定轨道器的重心。轨道器的重心和重量将影响到轨道器的性能,飞行计划要求精确地测量这2个数据。而后,拆除所有地面支持和检修设备,在航天飞机总装厂房内,外贮箱和固体助推器等待与轨道器对接。OPF厂房内的维护时间约为4~5月^[4]。

3.3 外贮箱处理操作

外贮箱(ET)的起竖操作在垂直厂房中进行,通过一部桥式吊车,ET从运输装置上吊起,安装在检验车间的垂直检查设备上,检查ET及其相关硬件是否在运输和操作期间发生损伤,以及ET的重量。分系统检查包括3项任务:a.彻底检查ET的外部 and 松动硬件,如液氧和液氢管路、排放口和增压管路,以及松动的SRB和轨道器接口硬件。b.将地面支持设备(GSE)和发射处理系统(LPS)连接至恰当的接口,执行电气、仪器设备和机械功能检查,同时执行液氢和液氧脐带管路泄漏检查。利用LPS执行电气、仪器设备、机电

接口和功能的检验,验证每个典型分系统的激励和响应。利用标准的泄漏检查程序检验流体和气体接口。

c.当外贮箱分系统的检查结果令人满意,拆卸并存放 GSE 和 LPS 设备。外贮箱开始准备出厂。利用桥式吊

车,外贮箱垂直起吊,并运至移动发射平台 (MLP),在 MLP 上外贮箱与 SRB 在接口点处完成连接。图 5 示出了 ET 在厂房中的维护操作^[5]。



图 5 在厂房中执行维护操作的 ET

3.4 固体助推器处理操作



图 6 在 SRB 处理厂房内起吊 SRB 部段

SRB 可采用铁路或船运的方式从 ATK 公司的制造厂房运抵 KSC 的 SRB 处理厂房。SRB 水平运输,两端带有端盖。每个端盖上配备有仪器设备,以监测运送过程中的振动载荷、温度和湿度。SRB 部段到达处理厂房后,便利用桥式吊车执行卸载,如图 6 所示。随后将它们放置于止动器或固定装置上接受检查。检查包括全面的外观颗粒检查,衬层与隔离层、外部和

因船运可能造成的损伤而执行每一部段的全面检查。前部和后部部段(封闭和喷管组件)将采用类似的方式进行检查。内部元件,如喷管延伸体、级间段部段、回收部段、头罩、后裙、电缆管、推力矢量控制(TVC)系统等,将放置于 SRB 厂房的可控区域内执行功能检查^[6]。

在将 SRB 转运至总装厂房(VAB)前,在 SRB 厂房内执行分组件的检查操作,包括电子设备系统安装与检查、回收系统安装、分离发动机安装,并将后裙连接到 SRB 的后部段以执行后裙电子设备的安装与检验。安装、维护 TVC 系统并执行泄漏检查。在 SRB 后部段与后裙组件对接之前,将分离发动机安装在后裙中。

通过运输装置将单个 SRB 转运至 VAB,SRB 一旦运抵 VAB,SRB 将从运输装置上起吊转运至 MLP 并完成定位。而后遵循相同的操作序列执行第 2 枚固体助推器的操作。2 枚 SRB 执行校准检验。安装 SRB 的电缆管道和电缆并执行电气设备检验。在 MLP 上,利用发射处理系统(LPS)执行综合与自动系统测试。图 7 示出了 SRB 在飞行器总装厂房内的操作。

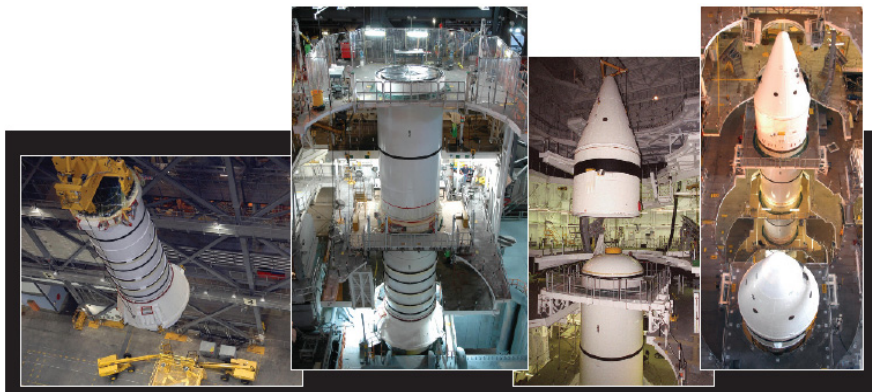


图7 SRB在总装厂房内完成组装操作

3.5 总装操作

从 OPF 厂房, 轨道器运抵航天飞机总装厂房 (VAB), 其 1 号间和 3 号间用于垂直组装航天飞机。2 号间和 4 号间用于飞行硬件和轨道器的存放。通过 250t 和 175t 的吊车, 轨道器提升至垂直位置。而后缓慢地下降到正在等待的外贮箱和 2 个固体助推器的一侧, 如图 8 所示。

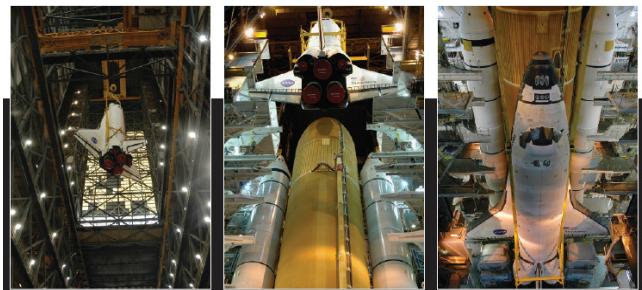


图8 轨道器提升至垂直位置并和外贮箱与固体助推器组合

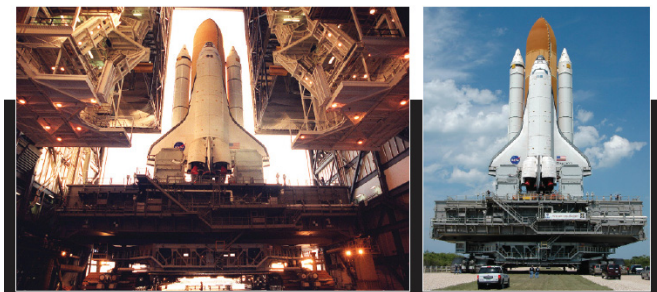


图9 航天飞机系统离开总装厂房去往发射台

外贮箱和固体助推器已经安装到移动发射平台 (MLP) 上。轨道器开始下降到外贮箱一侧, 完成轨道器与外贮箱的螺栓连接后, 拆除起竖吊索和承载梁, 执行总装和最后的测试, 以及接口的电气和机械检验。安装脐带火工品装置^[7] (但不通电, 直到轨道器运抵发射台)。6d 后完成检查。履带式运输车将移动发射平台

(MLP) 和完成组装的航天飞机系统运往发射台, 如图 9 所示。

3.6 发射台上的最终操作

飞行硬件和地面支持设备快速断开。有效载荷可在 OPF 水平装入轨道器中, 但也可在发射台上垂直装入其中。有效载荷完成安装后, 轨道器关闭有效载荷舱门, 宇航员航天服和其他机组成员的设备在发射台上执行安装操作。轨道器的 OMS 和 RCS 加注一甲基肼和二氧化氮作为推进剂。至此开始执行最后的发射前准备:

- 有效载荷完成最后检验和测试, 封装并准备执行飞行任务;
- 发动机组件完成检验后, 轨道器准备执行飞行任务;
- 检查分离使用的火工品装置, 确保飞行中固体助推器与外贮箱分离, 以及外贮箱与轨道器分离。

3.7 发射倒计时

发射倒计时始于发射前 43h, 发射控制人员就位并开始检查飞行系统和飞行软件, 以及显示系统。发射前 27h, 测试航天飞机火工品点火器的控制器。低温反应物加注到轨道器的燃料电池贮箱中。发射前 19h, 断开轨道器中部机身的脐带装置。声抑制系统水箱加注。发射前 11h, 发射小组完成所有的准备工作, 并排除航天飞机的任何故障, 解决地面支持设备存在的可能影响到发射操作的问题。如果未遇到问题或延误, 倒计时继续。轨道器准备启动燃料电池, 并执行外贮箱低温推进剂加注操作。倒计时的最后时刻包括机组进入轨道器、机舱门关闭、计算机和软件最后配置、发射小组最后准备查询、末期时序和发射。

4 航天飞机地面返场操作的启示

尽管航天飞机已经退役，但作为世界上第一个投入实际使用的天地往返部分可重复使用的运载器，它的研制经验和深刻教训仍将是人类探索宇宙、攻克航天技术难关的巨大财富，其在返场操作方面所带来的启示有：

a. 航空公司的管理、技术和维护人员应与未来可重复使用航天飞机的制造商持续地保持紧密的合作关系。通过采用航空公司的方法来执行维护操作，将大大降低停机检修的时间。

b. 从方案阶段开始，设计应强调并加强：维护和地面操作与性能同样重要的认识，并尽早地和持续地关注飞行器的可维护性和分系统设计。

c. 基于相同的基本准则整修组件，消除了一次完成整个飞行器的整修。

d. 通过采用维护机务组的方案可优化维护人力，因此减少续生人工成本。

e. 如果要想实现及时维护和维修，就必须安装机载

检查设备、专用的分系统飞行监测和机载发动机诊断系统。

参考文献

- 1 Space shuttle final technical report, volume IX ground turnaround operations and facility requirements[M]. San Diego, California: General Dynamics, 1969
- 2 Edson W F. Space shuttle ground operations and their relation to mission planning and execution, AIAA-73-600
- 3 Space shuttle: orbiter processing-from landing to launch. NASA facts[EB/OL]. [2017-06]. <http://spaceresearch.nasa.gov>
- 4 Schwartz R. Overview of STS ground operations/orbiter turnaround STS-1 through STS-7, N85-16926
- 5 Smith R G. Shuttle ground turnaround and launch projections, AIAA-82
- 6 Buckley R H. Shuttle ground turnaround operations[EB/OL].[2016-05]. <http://commons.erau.edu>
- 7 郑正路. 可重复使用运载火箭箭体结构检测及维护方法研究[J]. 航天制造技术, 2016(1): 68~70

#####

（上接第 46 页）

对试验样件中任选的不少于 10 个焊盘进行检测，结果表明所测焊盘中 Au 元素重量百分比均在 1%以下。

4 结束语

本文介绍了 QFN 封装芯片无引线表贴元器件去金搪锡的工艺方法，可有效去除焊盘的镀金层，使金元素质量分数控制在 1%以下，达到各军用标准中的要求，为避免焊接后焊点中出现“金脆”现象提供保证，可极大提高产品在服役期间的可靠性。

参考文献

- 1 王晓明, 范燕平. 锡-铅共晶焊料与镀金层焊点的失效机理研究[J]. 航天器工程, 2013, 22(2): 108
- 2 IPC-D-279, Design guidelines for reliable surface mount technology printed board assemblies [S].
- 3 QJ3012—98 航天电子电子产品元器件通孔安装技术要求[S].
- 4 QJ3011—98 航天电子电子产品焊接通用技术要求[S].
- 5 QJ3117A—2011 航天电子电子产品手工焊接工艺技术要求[S].
- 6 QJ3267—2006 电子元器件搪锡工艺技术要求[S].
- 7 IPC-J-STD-001E-2010, Requirements for soldered electrical and electronic assemblies [S].
- 8 ECSS-Q-ST-70-08C, Manual soldering of high-reliability electrical connections [S].
- 9 王继林, 白磊, 李珍珍, 等. 无引线镀金表面贴装器件搪锡技术[J]. 航天制造技术, 2011(5): 33~34