

对“猎鹰”9 火箭爆炸的初步分析

摘要：2016 年 9 月，“猎鹰”9 火箭进行发射前的静态点火测试时发生爆炸，导致星箭俱毁。本文详述了事故的概况，对事故原因进行了分析，同时阐述了 SpaceX 公司的改进方案，并提出了几点看法。

北京时间 9 月 1 日，携带 Amos - 6 卫星的 SpaceX 公司“猎鹰”9 火箭(F9 - 029)进行发射前的静态点火测试，在燃料加注过程中突然发生爆炸，导致星箭俱毁。这是继 2015 年 6 月“猎鹰”9 火箭在执行国际空间站第七次货运补给任务时发生爆炸后，该型火箭遭遇的第二次爆炸事故。

一、事故概况

按照原定计划，“猎鹰”9 火箭将于 9 月 3 日从卡纳维拉尔角 LC - 40 发射台发射，将以色列的 Amos - 6 通信卫星送入地球同步转移轨道，并进行海上回收试验。

(一) 火箭在进行静态点火测试时发生爆炸

北京时间 9 月 1 日 21 时 7 分，正在准备进行静态点火测试的“猎鹰”9 火箭在点火前约 8 分钟时，其二级液氧贮箱起火爆炸继而引燃一级，最终导致整枚火箭发生爆炸，卡纳维拉尔角 LC - 40 发射台也遭到严重破坏。由于静态点火前，发射台周围已经清场，因此此次事故未造成人员伤亡。

此次静态点火测试是发射前惯例进行的静态点火测试。从

2016 年起，为缩短静态点火与正式发射的准备时间，SpaceX 公司决定“猎鹰”9 火箭携带载荷(事先取得客户的同意)进行静态点火测试。因此，Amos -6 通信卫星在此次事故中也一同损毁。目前只有 SpaceX 公司在发射前进行静态点火测试。该测试在发射前进行旨在验证火箭可以执行发射任务。静态点火测试几乎等同于一次正式的发射，火箭要在发射台上点火燃烧数秒时间，火箭即将起飞时关机；并卸下所有推进剂、运回机库，同时检查所有静态点火的数据。

(二) 事故源于二级液氧贮箱

事故发生后，SpaceX 公司联合美国联邦航空管理局、空军、美国国家航空航天局(NASA)、美国运输安全委员会等机构对此次事故进行了联合调查。事故发生后，SpaceX 公司立刻发表声明称，事故发生时火箭正在进行燃料加注，事故似乎源于火箭二级(上面级)的液氧贮箱。

SpaceX 公司 2017 年 1 月对外公布，此次事故与浸泡在液氧贮箱中的“复合材料缠绕压力容器”(COPV)有关，由于与 COPV 直接接触的少量超冷液氧在液氮加注到 COPV 时中固化，随着氮气的充入，金属内胆逐渐膨胀并将固体氧挤压入包裹在外的碳纤维中，最终两者发生反应引发爆炸。COPV 是在浸在液氧贮箱用于保存氮气的罐子，其主要功能是给燃料加压。

(三) 事故影响

这次事故中星箭俱毁，并给发射场产生极大破坏，不仅给 SpaceX 公司带来重大的直接经济损失，同时导致该公司不得不推迟大量的发射，对其信誉也产生严重负面影响，间接损失更大。按照预定计划，在执行完 Amos -6 卫星发射任务后，SpaceX 公司 2016 年还将使用“猎鹰”9 火箭执行 7 次发射任务包括回收火箭的首次重复使用。由于事故，美国联邦航空管理局已经要求事故调查完成前，SpaceX 公司所有发射任务都将暂停。2016 年剩余发射

任务的延迟将使 SpaceX 公司 2017 年的发射压力大增，更多大额商业订单都受到影响，这将严重影响 SpaceX 的商业信誉。

二、对事故原因的分析

虽然发射前出现火箭损毁的情况非常少见，但并非没有先例。2003 年，巴西的 VLS 小型运载火箭在发射前准备过程中，火箭的固体发动机意外点火引起爆炸。但此次“猎鹰”9 火箭发射场爆炸事故有其特殊性，有两个关键的因素：一是碳纤维复合材料制成的氦气瓶；二是液氧固化并与碳纤维混合。SpaceX 公司的初衷为了提高火箭运力并降低发射成本而采用上述措施，但是没有想到就是因为这两个关键因素导致了此次事故的发生。

（一）“默林”1D 发动机使用复合材料氦气瓶实现增压

除了“默林”1D 发动机外，俄罗斯的 RD-191 和 RD-170 发动机、乌克兰的 RD-171 和 RD-120 发动机、日本 H-2 火箭上面级的发动机以及中国长征三号火箭的三级子发动机等都是采用将氦气瓶置于液氧/液氢中的冷氦增压方式。与其他发动机的氦气瓶采用钛合金不同，“默林”1D 发动机使用的氦气瓶即“复合材料缠绕压力容器”采用的是复合材料，它由铝制内衬和碳纤维外壳组成，内衬的作用只是隔绝容器内外，强度由外面缠绕的碳纤维提供。

与钛合金相比，复合材料无疑可以最大程度的降低火箭的重量并降低成本，这对于追求低成本发射的 SpaceX 公司无疑是最佳的选择。虽然具有成本和重量优势，但是碳纤维复合材料与液氧特别是固态氧的相容性较差，曾经发生过由有机复合物材料引发液氧发生爆炸的事故。

（二）加注的是超低温液氧

此次使用的是“猎鹰”9-1.2 型火箭，与之前的 1.1 型相比，

1.2 型火箭加注推进剂的温度更低(RP-1 煤油和液氧的加注温度是 20°F 与 -340°F, 而 1.1 型为 70°F 和 -298°F), 意图利用过冷推进剂的高密度特性以携带更多的燃料, 从而提升火箭的运力。

为避免充入氦气时导致推进剂温度上升继而使推进剂密度下降, 因此 SpaceX 使用的是液氮而不是氦气来填充 COPV。由于液氮的熔点远低于液氧的熔点, 加注液氮的过程中反倒吸收了液氧的热量, 导致部分渗入 COPV 碳纤维缝隙间的过冷液氧变成了固态氧。而碳纤维与固氧只需要一点点机械应力就能触发爆炸, 这最终导致了此次事故的发生。

三、归零改进措施

SpaceX 公司认为, 为了避免加注过程中再次出现液氧固化并与 COPV 挤压的问题, 将采取以下短期和长期改进措施: 短期改进措施是改变 COPV 的配置, 并加注温度更高的氦, 从而避免液氮冷去液氧并使之固化, 目前 SpaceX 公司已经对新的加注过程进行了超过 700 次的模拟实验, 无一失败; 长期的改进措施修改 COPV 的结构设计, 使之不会产生形变。

之所以采取上述改进措施, SpaceX 公司主要出于以下考虑: 由于弃用 COPV 而改用合金氦气瓶, 会极大增加火箭重量; 而使用过冷液氧可大幅增加火箭运力, 并便于火箭回收。因此, 为在短期内恢复发射, SpaceX 公司不会同意对 COPV 或过冷液氧进行任何修改, 而只对燃料加注过程进行修改, 如控制液氮/氦气加注温度, 以避免液氧固化且并不加温液氧。

2017 年 1 月 15 日, “猎鹰”9 火箭以一箭十星的方式将铱星公司下一代首批 10 颗卫星送入极轨道, 成功实现复飞。此次任务中, SpaceX 对加注过程进行了调整: 一是在二级液氧贮箱加注前, 先加注完氦, 使 COPV 在加注液氧之前进入完全稳定的状态, 不会发生形变; 二是不再使用液氮, 而使用温度稍高的氦。可以

说通过此次发射任务，SpaceX 充分验证了其归零改进措施的正确性。

四、几点看法

此次“猎鹰”9 火箭的爆炸给了商业航天公司一个教训，即应在低成本和高可靠性之间寻找更好的平衡点，不能一味追求低成本而忽视航天发射安全。不过探索太空是需要付出一定代价的，几乎所有发射运载火箭的国家都有过失败的教训。面对火箭发射失利时，应该保持理性的态度，毕竟，航天是一个高风险的事业。

（一）引入新技术和新方法必须进行充分验证

SpaceX 公司在采用超低温推进剂后出现过多次意外：2015 年 12 月，“猎鹰”9-1.2 火箭首飞任务前，在发射前的点火试验中，由于超低温液氧加注造成了多次试验延后；2016 年 3 月，在发射 SES-9 通信卫星时，再次因为低温液氧加注问题多次推迟发射时间。联合发射联盟也曾表示，采用超低温液氧的效果有限，但是复杂度会大幅增加，而且起飞时液氧的状态也很难确定。此次事故原因又是和超低温液氧有关，这表明这种技术改进的效果和风险相比就不值一提了。因此，在引入新技术、新方法之前应该充分考虑到其附加影响，对实际能够产生的效果和潜在的风险进行详细评估，权衡对比之后，再确定是否值得尝试。

（二）低成本必须建立在可靠性基础之上

SpaceX 公司以其低廉的发射价格、灵活的发射服务和优异的前期表现赢得了各方客户的青睐。为了充分降低航天发射成本，SpaceX 公司不遗余力地采取各种措施力图实现其发射成本的最低化，其很多零部件都是用高可靠工业级而不是航天级产品；测试设备也是先讲低成本再求高可靠；就连火箭进入发射场，也要求时间短、用人少以降低成本；尤其是在火箭发射前，SpaceX 公司

不进行火箭的整套测试而是直接把火箭 + 载荷运到发射台上进行点火测试，以节约成本。上述举措在实现低成本的同时，同样带来了安全隐患。“猎鹰”9 火箭在 2015 年的事故就是因为 SpaceX 公司外包采购的火箭零部件质量出现问题导致火箭发射后发生爆炸，此次事故则是 SpaceX 公司为了缩短发射周期，在完成星箭对接之后再进行的地面试验。上述事实说明，航天发射的低成本必须建立在确保安全可靠的基础上，绝不能为了低成本而忽视可靠性。此次事故发生后，英国的卫星运营商 Inmarsat 公司就取消了与 SpaceX 公司的卫星发射订单，改由“阿里安”5 火箭发射。这充分说明，对于高风险的航天发射任务而言，可靠性一直是最基础和最重要的要求，一旦发生事故，低成本也将会变得毫无意义。

(三) 商业航天再受挫折但将继续发展

美国商业航天发展曾遭遇过多次挫折，“安塔瑞斯”火箭和“猎鹰”9 火箭先后发生过爆炸，虽然会加剧对商业航天公司能力的怀疑，但这不会影响美国发展商业航天的决心和信心，美国政府不会轻易放弃促进商业航天发展的政策。NASA 为了降低近地轨道的运输成本，从 2006 年开始先后制定并实施了商业轨道运输服务(COTS)计划和商业乘员计划(CCP)，通过商业能力为国际空间站提供货物和人员运输能力。目前 COTS 计划已成功实施，CCP 正在加紧推进。作为 NASA“两条腿走路”策略中的重要内容之一，美国的商业航天运输能力不会被削弱，只会继续被加强。而且随着特朗普新政府的上台，充分利用商业力量是未来美国载人航天发展的必然趋势。

(中国国防科技信息中心 北京航天长征科技信息
研究所 北京跟踪与通信技术研究所)