

NASA 发布 SpaceX CRS - 7 故障调查报告

2015 年 6 月 28 日，美国 SpaceX 的猎鹰 9-1.1 火箭在执行第 7 次国际空间站货运补给任务(SpaceX CRS -7)时，火箭升空 2min 19s 后出现故障发生爆炸，龙飞船及其携带的 1.9t 左右的载荷也全部损毁。事故发生后，NASA 一方面责成由 SpaceX 主导的调查委员会进行调查，而另一方面又进行了独立调查。2015 年 11 月，SpaceX 调查组最终将故障定位在二子级液氧贮箱中的氦气瓶支架制造材料问题导致其在任务中失效。2018 年 3 月 12 日，NASA 独立评估小组发布了《NASA 独立评估小组对 2015 年 SpaceX CRS -7 事故的故障调查报告》，现将主要内容摘译如下：

一、背景

SpaceX CRS -7 任务由 SpaceX 猎鹰 9-1.1 火箭和龙飞船执行，搭载 1952kg 国际空间站物资。在火箭起飞约 139s 时，运载火箭在二级液氧箱出现异常发生爆炸，但地面控制中心仍持续接收到来自龙飞船的遥测信号，直至其坠落至地平线以下。

事故发生后，根据美国联邦航空管理局 (FAA) 认证需求、NASA 发射服务项目 (LSP) 合同要求和 NASA 相关政策要求，由 SpaceX 主导的故障调查委员小组 (SpaceX AIT) 和 NASA 独立评估小组 (NASA IRT) 分别对事故进行了调查。

2015 年 11 月，SpaceX 调查组向 FAA 提交了故障调查最终报告。报告指出：在一子级工作期间，火箭二子级液氧贮箱中的氦气瓶支架失效，引起氦气泄漏，最终导致液氧贮箱因压力过大而

破裂。该支架是由一家外部提供商提供的，SpaceX 公司因此对支架的设计方案进行了改进，并将支架材料更换为镍基合金。

NASA 独立评估小组由 LSP 负责组成，对 SpaceX CRS - 7 任务中发生的失败事件进行独立调查，并确保所提出的纠正措施得到落实。其主要职责包括：1) 独立评估导致 SpaceX CRS - 7 任务失败的事件(制定独立的事件时间表；独立审查故障树；对遥测数据进行独立评估)；2) 确保所提出的纠正措施得到落实；3) 验证 SpaceX AIT 的调查工作；4) 通知 NASA 的风险状态，以支持 SpaceX 重返发射活动；5) 确定并提出如何研发、运行和获取更可靠系统的建议。

二、IRT 的独立工作流程

此次事故的异常事件发生在 800~900ms 的时间范围内，因此，为了确定决定性事件的时序，IRT 对 CRS - 7 任务的遥测数据进行了独立分析，并独立制定了毫秒级事件的详细时间表。IRT 独立分析了猎鹰 9 系统，并评估了 SpaceX 的故障树。除了猎鹰 9 的二子级以外，IRT 还对 SpaceX 测试的所有可能引发关机的故障树模块(即一子级、推进系统、电气、龙飞船系统等)进行了独立分析、评估和审查。IRT 对猎鹰 9 系统的评估完全独立于 SpaceX，对整个飞行过程中各个系统的遥测数据做出自己独立的判断，并通过多个工程审查委员会来审查猎鹰 9 系统和数据。最后，IRT 得出结论，除了二子级故障树模块之外的所有模块都可能造成关机，基于对发射前和发射过程中收集的猎鹰 9 遥测数据的详细评估和分析，以及对捕获发射和失败的摄影和视频媒体的审查，IRT 确定猎鹰 9 故障的直接(或近似)原因是二子级氧箱的破裂。IRT 还对 SpaceX AIT 开发和研究的“主要失效情景”(即：二子级氧箱内的复合材料缠绕压力容器(COPV)失去固定，并击中氧箱箱底圆顶导致其破裂)进行了独立的详细审查。

此外，NASA IRT 还对其他可能发生的失效模式进行了研究。最终确定两种可能失效模式，其中每一种都可能促成 COPV 失去固定或与其同时发生。对这两种故障模式描述如下：液氧输送管路的隧道管可能发生泄漏，该泄漏从二子级的液氧箱向下通过二子级煤油箱并最终进入二子级发动机。

故障模式 1：假设 RP-1 泄漏到液氧输送管路外部的隧道管，使液氧升温，从而导致液氧喷出。然而，通过热分析很快确定了泄漏到液氧输送管路外部隧道管的 RP-1 的热量不足以影响到液氧输送管路中的液氧温度。后经过建模和分析发现，在 RP-1 未泄漏至液氧输送管路外部的隧道管之前，液氧已从输送管路泄漏至隧道管。这样，环绕在液氧输送管路周围的 RP-1 就能够传递足够的热量使液氧气化，并最终溢出。这成为了故障模式 2。评估小组迅速利用马歇尔太空飞行中心的资源，建立了一个试验室，并进行了测试(如图 1 所示)，以验证该故障模式中的热传递的假设。经过为期两周的测试后，IRT 能够确定故障模式 2 中有更多的热量传递，但仍不足以在 800~900ms 的时间范围内发起喷射事件。



图 1 故障模式 2 测试

三、IRT 调查总结

经调查，IRT 最终验证了大部分在 800ms – 900ms 失效时间段内得到的 115 个遥测数据，但目前仍有 9 个数据没有被验证。IRT 独立调查的最终结论为：

1) 二子级氧箱破裂的直接原因是二子级氧箱内的 COPV 脱离固定。

2) 引发的原因是支撑 COPV 的轴向支撑失效，继而 COPV 脱离固定，最终导致二子级氧箱内的气态氦 (GHe) 输送管路系统破裂。

3) COPV 轴向支撑支柱的螺纹铸造不锈钢吊环螺栓在上升载荷作用下断裂，从而使 COPV 从其支座脱离，由于浮力而加速，从而以巨大的力量冲击氧箱箱底。

4) 值得注意的是，IRT 与 SpaceX AIT 的调查结果显示的直接原因是一致的，不同之处在于事故的根本原因。SpaceX 公司在其 AIT 报告中将“材料缺陷”标识为螺栓断裂的“最可能”原因，然而，IRT 并不认为“材料缺陷”是“最可能”的原因，而是将“螺栓制造损坏”“支架错误安装”“螺栓附带损伤”和“轴向撑杆其他部位断裂”均视为导致 COPV 失去支撑的可疑因素。最后 IRT 认定：此次失败是由于设计错误导致的，即，SpaceX 公司在关键部件上选择使用工业级（不同于航天级）17-4 PH SS（沉淀硬化不锈钢）铸件（“螺栓”）。并在未对工业级部件进行充分的筛选或测试的情况下进行使用，未考虑制造商对使用其工业级部件时的 4:1 安全系数的建议，并且未根据预估的飞行条件对部件进行适当的建模或适当的载荷测试。这种设计错误与猎鹰 9 火箭 CRS-7 发射失败直接相关（图 2 为螺栓、支架及复合材料缠绕压力容器）。

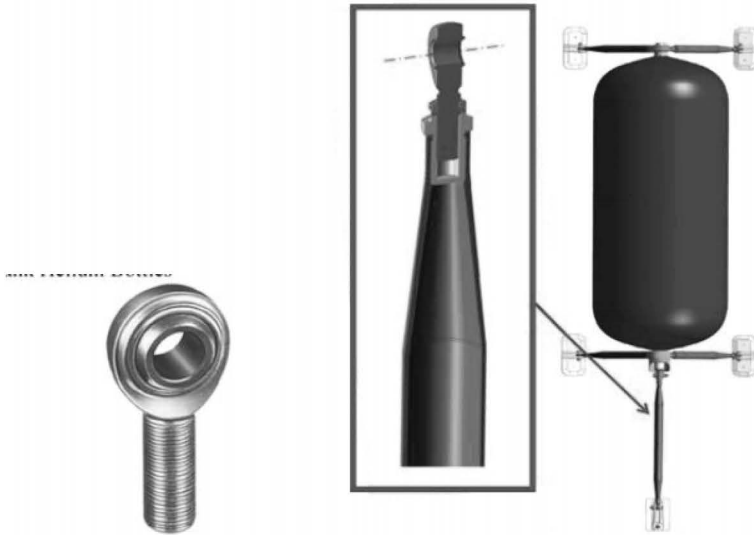


图 2 螺栓、支架及复合材料缠绕压力容器

5) 虽然 NASA LSP 没有对 SpaceX CRS 计划进行评估, 但由于 LSP 已向 SpaceX 授出“高价值”NASA 有效载荷的发射服务合同, 并且 SpaceX 公司近期正在进行 NASA“二类载荷”发射认证活动, 因此 NASA LSP 对猎鹰 9-1.1 火箭已经进行了充分调研。

6) 纠正措施还解决了 SpaceX 和 NASA LSP 调查过程中发现的其他问题。

7) 该结论同时适用于猎鹰 9-1.2 火箭。

四、技术结论及建议

表 1 列出了 IRT 识别的 4 个技术结论。表 2 列出了 IRT 识别出的 3 项技术建议, 如果全面实施, 应能防止类似的故障再次发生, 并提高猎鹰 9 运载火箭的可操作性。

表 1 IRT 识别的技术结论

技术结论(TF)	
TF-1	设计错误：选择在低温条件下和恶劣的飞行环境中，在关键部件上使用工业级(不同于航空级)17-4 PH SS(沉淀硬化不锈钢)铸件(“螺栓”)。在没有对工业级部件进行充分的筛选或测试的情况下进行使用，不考虑制造商在使用其工业级部件时的4:1安全系数的建议，并且没有根据预估的飞行条件对部件进行适当的建模或适当的载荷测试。该设计错误与猎鹰9火箭CRS-7发射失败直接相关。
TF-2	使用商业上采购的钢丝绳为液氧传输管路组件提供结构支撑，并未考虑制造商在长度应用中对预先拉伸的钢丝绳所列出的注意事项。但这与本次发射失败没有直接关系。
TF-3	使用流量为0.01标准立方英尺/分(scfm)的气态氮对液氧输送管路外部的隧道管路进行吹除。但这与本次发射失败没有直接关系。
TF-4	在飞行遥测中对非确定性网络数据包的接收实施了新的方法，增加了接收数据时间，导致大量部分的异常数据由于二子级飞行计算机中的网络缓冲而丢失。

表 2 IRT 识别的技术建议

技术建议		所针对的技术结论
TR-1	SpaceX公司应对关键飞行部件中使用商业零件进行详细评估，并对制造商提出的相关注意事项进行充分关注。	TF-1/TF-2
TR-2	SpaceX公司应在火箭子级测试和发射台操作中建立和保持适当的吹除率。	TF-3
TR-3	SpaceX公司需要重新思考新的遥测架构，并对其遥测实施文档进行大幅改进。	TF-4

IRT提示：以上所有可靠原因和技术发现均在猎鹰9 Jason-3任务中得到了纠正和/或减轻。此次任务于2016年1月17日顺利

执行，代号“F9-19”，是猎鹰 9-1.1 火箭的最后一次飞行。

五、小结

对 SpaceX 在 2015 年的 CRS-7 发射任务故障进行的调查，由 SpaceX 主导的故障调查委员小组和 NASA 独立评估小组分别进行。最初，SpaceX 故障调查委员小组的调查显示故障根本原因是商业采购部件导致复合材料缠绕压力容器(COPV)的制造缺陷，最终造成了该事故。而 NASA 独立评估小组历时两年多时间，最终调查结果认为——不能单纯归咎于 COPV 制造缺陷，更主要的根本原因是 SpaceX 本身的设计工艺和采购标准不达标。该报告指出，SpaceX 在给外包制造商下达的设计标准上，没有选择更严格的航空航天级标准，只选择了工业级，并且在使用中没有对提供商给予足够的重视，由此导致复合外包装压力容器(COPV)质量不过硬，最终酿成事故。