

从火箭回收航天器全链路回收，人们仍面临诸多技术挑战。

在火箭的燃料选择上，液氧煤油和液氧甲烷是当前可回收火箭的两大主流推进剂。猎鹰9号使用液氧煤油发动机，而朱雀三号、星舰、新格伦等新一代火箭普遍选择液氧甲烷。

从工程实践看，液氧煤油优势在于技术成熟、密度高，然而它的含碳量高，燃烧后易积碳，每次飞行后必须对发动机彻底清洗，显著增加复用维护工作量。相比之下，甲烷分子结构简单，燃烧更充分，几乎不积碳，火箭回收后简单维护就能再次使用，周转效率极高。中国国家航天局发布的《液氧甲烷火箭发展概览》指出，甲烷在发动机维护性上有天生优势。

陶建中总结了液氧甲烷的四点优势：第一，燃烧充分、环保，发动机积碳少、易清除；第二，成本较低；第三，比冲（衡量火箭发动机效率的核心参数，指单位推进剂产生的冲量）略高；第四，火星和土卫六存在甲烷，在未来的深空探测中，这有利于就地利用资源。

不过，液氧甲烷也非完美，其组合密度比液氧煤油低约20%，能量密度不如液氧煤油。

在箭体材料上，猎鹰9号采用铝合金，追求轻量化，但回收场景中受热更敏感，返回再入时

需额外铺设隔热层。朱雀三号和星舰则选择不锈钢作为箭体主结构材料，虽然更重，但耐高温性能更好、更容易加工和维修，原材料成本仅为铝合金的约五分之一。朱雀三号采用不锈钢箭体，相比猎鹰9号的铝合金箭体，它的强度更高；而它采用液氧甲烷发动机，推力大、多台并联后总推力有富余，能覆盖不锈钢箭体多出的重量。

火箭二级回收，被公认为下一代技术的最大难点。目前全世界只有一级回收实现工程化，二级仍为一次性使用。火箭二级的飞行高度比一级更高，再入速度极高，热环境极端恶劣，要实现二级回收需解决耐高温热防护、高精度再入制导、末端减速与着陆、燃料消耗等一系列难题。SpaceX正在星舰项目中尝试回收上面级，计划在接下来的试飞中用发射塔机械臂在空中捕获回收全长52米的星舰飞船。如果火箭二级回收技术能有所突破，航天发射成本将进一步下降。

比二级回收更紧迫的需求，是火箭从“能回收”到“能复用”的跨越。SpaceX从2015年首次成功回收实现稳定商业复用，也花费了好几年的时间。如今中国只完成了“发射加回收”的单次验证，接下来要面临同一箭体多次复飞、快速检修周转的考验。好消息是，长征十号乙研制团队

计划在2026年底前完成一子级复用飞行；朱雀三号团队正在对回收的一子级进行“全面解剖分析”，按之前公布的计划，他们将争取在2026年第四季度尝试首次回收复用飞行。这些尝试成功后，将标志着中国真正掌握火箭复用技术。

在重型运载火箭领域，中国研发中的长征九号同样将可重复使用作为核心目标。据中国航天科技集团介绍，长征九号采用“一次设计、三个构型”思路，近地轨道运载能力覆盖50吨到140吨。其中一级重复使用构型计划2030年首飞，两级完全重复使用构型计划2033至2035年首飞。这意味着长征九号从设计之初就将回收复用纳入考量，有望避免传统重型火箭“一次性使用”的高成本问题。不过，长征九号能否实现首次发射即可回收，还取决于其一级重复使用构型的研制进度，人们可以对此抱以期待。

与火箭回收技术同步推进的，是中国商业航天发射工位的快速扩容。海南商业航天发射场是中国首个商业航天发射场，一号、二号工位已投入运行，其中二号工位是国内首个“通用型”液体火箭发射工位，适配3.35米至5米直径的近20个型号火箭，采用“三平”快速测发模式，火箭转场最快3天可发射。陶建中告诉《新民周刊》记者：