

反应发动机公司破产：SABRE发动机发展停滞

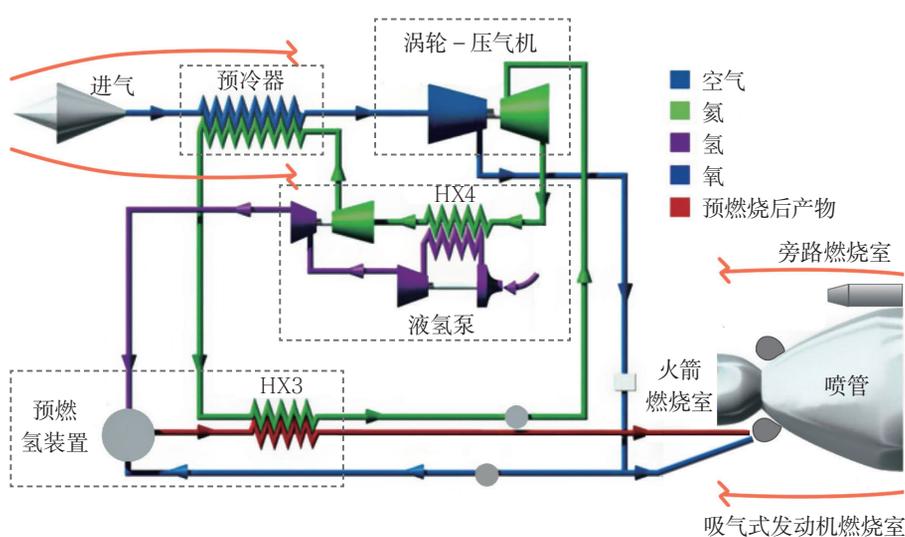
REL Goes Into Bankruptcy : Taking the SABRE With It

■ 谭米 马慧文 苗辉 / 中国航空发动机研究院

2024年10月，英国反应发动机公司（REL）在未能筹集到约2000万英镑（2570万美元）的额外资金后被迫关闭。此前公司曾长期尝试与阿联酋战略发展基金达成交易，但未成功。而REL的战略股东BAE系统公司和罗罗公司也拒绝提供足够的桥接资本，最终导致其资金链断裂，并宣布破产。

英国REL由罗罗公司的3名前员工于1989年创建，公司继承了霍托尔空天飞机项目研究成果，并提出“佩刀”（SABRE）发动机方案。SABRE发动机由吸气式核心发动机、火箭发动机、发动机舱、数据仪器与电力系统，以及辅助系统5个部分组成。其中，吸气式核心发动机由涡轮发动机、冲压发动机和热循环系统组成，是整个发动机方案的核心。SABRE发动机具有吸气和火箭两种工作模式，能够将飞行器从静止状态无缝加速到入轨速度。在稠密大气层（速度 $<Ma$ 5.5，高度 $<28000m$ ）飞行时采用吸气工作模式。其中，速度 $<Ma$ 3时，由涡轮发动机提供动力；速度 $>Ma$ 3时，涡轮发动机关闭，由冲压发动机提供动力。在高空高速（速度 $>Ma$ 5.5，高度 $>28000m$ ）飞行时，采用氢氧火箭工作模式，将飞行器加速到入轨速度。

SABRE发动机经过多次技术发展迭代，形成SABRE-3方案、SABRE-4方案以及“弯刀”（Scimitar）发动机等概念方案。其中，SABRE-4方案可行性最高，其吸气式发动机部分包含3个重要的部件：强预冷器、换



SABRE—4发动机吸气式部分循环示意图

热器（HX3、HX4）和预燃氢装置。超临界氢气作为传热介质，在流经预冷器时对高温进气进行冷却，之后流经HX3换热器，被预燃氢装置输出的高温燃气加热。高温的超临界氢驱动涡轮旋转，并在经过HX4换热器时被液氢冷却，最后再流向预冷器，形成闭环。

SABRE发动机总体进展

2015年，英国商业、信息和技术部（BIS）通过英国航天局向REL拨款5000万英镑，用于开发SABRE发动机，重点推进吸气式发动机技

术验证机 DEMO-A 的设计，计划于2019年年底完成发动机集成，为地面测试做好准备。2022年，英国航天局委托英国航空航天公司（The Aerospace Corporation UK Ltd.）评估SABRE计划的实施情况。评估结果显示，DEMO-A项目实现了所有关键设计成熟度目标，并对一些子系统进行了测试，但并没有准备好集成验证机测试。

REL原计划利用英国航天局拨款主要推进5个部件的研制：预冷器HX1、涡轮-压气机C1T1、预燃氢装置PB1、微管换热器HX3和微管

表1 SABRE 发动机各部件研发进展

研究项目	预算金额/ 万英镑	实际金额/ 万英镑	交付情况
DEMO-A	2561.6	2785.3	完成制造准备情况审查 (MRR)
测试设施	821.6	492.5	总共完成 27 个里程碑, 还有 23 个里程碑被取消
HX1	615.5	964.5	完成全尺寸测试
PB1	90.7	100.7	完成全尺寸测试
HX3	29.3	65.5	完成部分测试
HX4	11.0	5.1	完成制造演示
喷管	22.8	6.4	完成 1 个里程碑
C1T1	2.9	0	未知
进气道和旁路燃烧室	12.9	12.9	完成 1 个里程碑
氢脆	28.5	32.7	完成 2 个里程碑

换热器HX4。此外,还对喷管、进气道、旁路燃烧室和氢脆等进行了研究,各部件和项目的实际研究情况如表1所示。除了C1T1之外,其余的部件都取得了一定进展,预冷器和预燃氢装置完成了全尺寸测试。

从2015年来,REL获得了12项授权专利。此外REL内部还有35个未公开专利,大部分关于预冷器、整个系统设计和SABRE发动机循环所需的涡轮机械开展。

SABRE 发动机关键技术进展

预冷器

预冷器是SABRE发动机的核心技术,能够在高超声速飞行时,将高温进气瞬间冷却,以保护涡轮发动机不被烧蚀。REL的预冷器由数以千计的微管排列而成,微管直径为0.88mm,壁厚仅为0.04mm,内部承受的压力高达20MPa。通过充分运用“超临界传热”和“微细尺度传热”的特点,使预冷器达到紧凑、

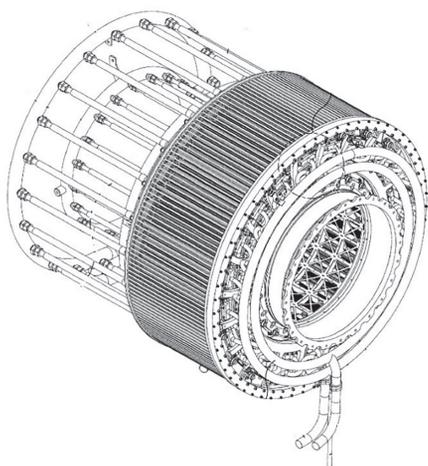
轻质和高效的目标。经过多年探索,REL在紧凑强预冷器流动换热机理、结霜抑制、极薄壁微细管制备及成型、密集微细管束焊接工艺和高流试验测试等关键技术取得了突破。

REL于2005年成功制造出预冷器试验样件,2011年开始对全尺寸预冷器样机进行常温进气试验验证。2019年10月,REL与美国国防预先研究计划局(DARPA)合作,在美国科罗拉多州航空航天港TF2实验站完成了全尺寸预冷器样机在Ma3.3和Ma5条件下的高温考核试验。TF2实验站采用J79涡喷发动机作为热源来产生高温高速气流,可在最大加力条件下获得总温约1000°C的气流环境,能够覆盖SABRE发动机验证机的全部飞行包线。在Ma5条件测试中,预冷器在不到0.05s的时间内成功地将高达1000°C的来流冷却到约100°C,有效地证明了预冷器冷却气流的能力。

2024年8月,REL宣布成功实现预冷器与涡轮发动机的串联运行,并在Ma3.5条件下进行了地面测试。地面测试在英国S&C热流体中心进行,使用了1台改装的的诺姆(Gnome)涡轴发动机作为燃气发生器。该发



REL 预冷器与涡轮发动机串装试验



预冷器结构

发动机由罗罗公司于20世纪50年代研制，进口流量为 $5.7 \sim 6.2 \text{ kg/s}$ 。REL最初预设的试验条件为 $Ma2.3$ ，后来在试验过程中逐步调整到 $Ma3.5$ （来流温度 745 K ），该速度接近SR-71“黑鸟”超声速侦察机的最大飞行速度。测试验证了预冷器出口和压气机进口之间的特殊紧密耦合设计，并证明了预冷器的出口气流不会引起任何的压气机进口畸变、共振或其他不稳定情况发生。

其他关键技术

预燃氢装置产生的高温燃气为超临界氢提供可控的热源。2021年2月，REL在英国格洛斯特郡的肯布尔机场与S&C热流体中心合作对氢燃烧装置进行了测试，使用罗罗公司诺姆燃气涡轮发动机提供进气，并专门制造了氢气输送装置。REL称预燃器在测试期间提供了比预期更大的性能范围。

2022年7月，REL成功将高性能HX3换热器和氢预燃烧器模块集成，形成“集成预燃器系统”，与S&C热流体中心合作开展地面测试。测试台需要对用于燃烧的氢气和空

气的质量流量、氢冷却剂的质量流量，以及换热器排出冷却剂的压力进行闭环反馈控制。测试中，HX3的最高温度达到 1126°C 。REL表示，性能超出了模型预测，热交换略多，压力损失比预期略少。

REL现状及前景分析

工程应用困难是REL走向破产的主要原因

SABRE发动机方案包括吸气式发动机和火箭发动机，虽然火箭发动机最终被决定外包，但吸气式发动机结构仍旧非常复杂。REL直到现在也没有完成吸气式发动机系统集成与测试，只对预冷器、换热器、预燃氢装置等部件进行了验证。从2024年8月进行的预冷器与涡轮发动机串装试车可以看出，试验中的预冷器采用多级并联的方式，尺寸较大，需要在发动机总体结构匹配与优化技术等方面继续发力，短期内难以实现工程实际应用。这也可能是BAE系统公司和罗罗公司拒绝继续投资的原因之一。

预冷仍旧是高超声速领域具有前景的技术之一

REL的破产并不意味着预冷技术路线失败。预冷器与涡轮基组合循环（TBCC）发动机结合，形成预冷TBCC发动机方案，可有效解决TBCC模态转换过程中“推力鸿沟”问题。美国的初创公司赫尔墨斯完成了预冷TBCC缩比发动机的原理验证，采用预冷器技术将涡轮发动机的工作范围拓展到 $Ma3.3$ ，亚燃冲压工作范围为 $Ma2.8 \sim 5.0$ ，并于2024年使用普惠公司F100发动机对其预冷器进行了测试。中国航空发动机研究院提出了采用液态金属为

换热工质的强预冷方案，取得了良好的进展。选择合适的传热工质和热力循环构型是方案能否成功的关键性因素。

英国政府仍有可能拯救REL公司

2022年，英国皇家空军提出可重复使用的高超声速飞行器试验计划（HVX），旨在快速开发关键的高超声速技术，包括新型吸气式推进架构、创新的热管理系统和先进飞行器概念。REL、罗罗公司、英国皇家空军快速能力办公室（RCO）和英国国防科学技术实验室（Dstl）等共同参与该项目。此外，2024年5月，REL还被选中参与英国高超声速框架计划（HTCDF），以发展本土高超声速导弹能力。REL的破产无疑会对这两个计划产生重大的影响。考虑到REL在英国高超声速领域的重要性，后续英国政府可能会采取相关救济措施，正如1971年罗罗公司破产之际，英国政府为了保护本土航空工业，将罗罗公司收归国有，助其起死回生。

结束语

目前，REL已经由普华永道公司接管，公司总部173人被裁员，仅剩35名员工被保留以完成一些现有订单并支持逐步关闭运营。REL是高超声速领域的明星企业，其提出的SABRE发动机方案也一度被认为是最有应用前景的高超声速动力解决方案之一。此次突然宣布破产令外界十分震惊，同时也为英国高超声速技术的发展蒙上了一层阴影。

航空动力

（谭米，中国航空发动机研究院，工程师，主要从事航空发动机科技情报研究）