

卫国飞天，托举有我——回望中国航天固体动力事业一甲子



左图：2022年12月9日，由中国航天科技集团第四研究院提供全部固体发动机的捷龙三号火箭在黄海海域首次海上热发射成功。

右图：1966年8月，四院人在呼和浩特南地野外进行发动机试验准备。

中国航天科技集团第四研究院供图



中国航天科技集团第四研究院，成立于1962年7月1日，是我国历史最悠久、实力最强、规模最大的固体火箭发动机专业研究院，60年来划出了中国航天固体动力事业从无到有、从小到大、从弱到强的轨迹，为火箭运载、导弹卫

本报记者王若宸

头顶星空，频传佳讯；中国航天员乘组实现“太空会师”，中国空间站将建成全人类的“太空家园”，北斗系统完成全球组网，探月工程拟在月球背面采样、在月球南极“逐水”……“中国航天”发展提速，跻身世界第一方阵。

航天发展，动力先行。为中国“飞天梦”提供不竭动力的中国航天固体动力事业，又在天地之间，划出了一条怎样的轨迹？

从此“东方红”

电影《我和我的父辈》中，科研人员将我国固体动力事业的起步写成诗：渺小的尘埃是宇宙的开始，平凡的渺小是伟大的开始。

1962年7月1日，在四川泸州一个山江环绕的小镇，中国第一个固体火箭发动机专业研究所——隶属国防部五院的固体发动机研究所正式成立，1963年12月3日，又升级为“国防部五院四分院（固体发动机研究设计院）”，后来发展为今天的中国航天科技集团第四研究院，简称“四院”。

“冲天”大业平地起。四院人既是技术员又当泥瓦工、和泥、搬砖、吊线，在山峦间的一块空地上，垒起三堵矮墙围成的小瓦房。

中国第一座固体火箭发动机试车台，“只有一张双人床大小”，四院人李栋林描述：“小瓦房里，用水泥砌了一个长约70厘米，宽、高各约40厘米的小墩子，中间留一个土坑，看起来还不如农家的小锅台‘气派’。”

发动机点火试车时，喷口朝上、头朝下，撅着屁股埋进“锅台”里“拱火”。就在这简陋的试车台里，技术员们完成了一发发热试车、“冷试车”、水压试车，又“发明”出水泥管架成的火工品库房、草棚搭起来的装配车间、油毛毡盖出来的胶卷冲洗暗房……

“土法上马”，是为了“马上顶用”。1965年7月，由四院时任副院长、火箭专家杨南生率领研制的中国固体事业的“头生子”——直径300毫米固体发动机，在靶场打出的6发试验弹全部圆满成功。这标志着中国有自己的固体发动机了，中国有研制固体火箭的能力了！

这是中国固体火箭事业从无到有的历史性突破。钱学森出席四院会议时兴奋地说：“你们自力更生，不经仿制，短短几年就获得很大成功。这是很了不起的，是中华民族的骄傲！”

那时，王士宝大学毕业分配到四院刚2年，“泸州地处长江之畔，山清水秀、空气湿润，是鱼米之乡，我感觉就像生活在天堂。”他说。

可大家越来越发现，多个研制和生产环节“喜干不喜湿”。

选择“宜家”还是“宜业”？纵然心有不舍，四院人还是收拾好了行囊——1965年，全院北迁，向内蒙古一个叫“南地”的偏远小村庄进发。

那一年，国家实行院部合并，四院脱离了部队建制，集体转业，不少同志套成地方级别后工资下调。王士宝也换下了引以自傲的军装，把红帽徽和红领章包了又包，珍藏起来。

同年，中国正式提出要发射自己的人造地球卫星。此前，苏联发射的首颗人造卫星重83.6公斤，美国的重8.2公斤。而我们要发射的人造卫星，重达173公斤。重量的背后，是技术的较量。国家决定以两级液体发动机加第三级固体发动机，构成我国第一枚运载火箭“长征一号”，将人造卫星送入预定轨道高度。

这第三级发动机的研制任务，四院当仁不让。而要完成这个任务，就要将发动机直径从300毫米一下增加到770毫米。

尺寸倍增可不那么简单，推进剂配方要跟着变，壳体要保持匀速自转，还要能在真空状态下工作……杨南生又率领人马，一头扎进这个艰巨又光荣的任务。

“由于长期在风沙、严寒中奔波，杨南生的右腿患上严重的坐骨神经痛无法行走，他使用右脚踩住自行车脚踏，左腿一下一下划拉着往前走，来回奔波于生产、试验现场，带着科研人员

和制造工人们，没日没夜地啃这块硬骨头。大家笑称这是‘荒漠走单骑’。”秘书廉茂林回忆。

1970年4月24日，“东方红一号”卫星发射成功，三级发动机合力将其准确送入预定轨道，中国面向宇宙唱响《东方红》。

当年的“五一”劳动节前夕，技术员陈克明、女工李德春代表四院登上天安门城楼参加庆典。晚上八九点钟，钱学森举头望天，向毛泽东、周恩来指出卫星所在的空域，那里，一个小小亮点朝祖国首都的上空飞掠而来。

“东方红一号”划出的轨迹，永远镌刻在历

史的天空中。两千多年前就曾发出“天问”的中国，自此进入太空时代。

伴虎降龙虎

进入20世纪70年代，为响应国家三线建设的号召，四院开始了新一轮搬迁——大部迁往陕西蓝田辋川镇，固体推进剂研究所迁往湖北襄阳郭峪山沟。两地选址遵循同样的原则：山、散、隐、洞、羊拉屎。

固体推进剂研究所堪称“守在航天三线建设最苦的点”。它，有何特别？

向宇宙星辰的奔逃，始于地面上的光与燃。通过一系列化学反应产生推力，才能一飞冲天，这就是发动机。对固体发动机而言，推进剂堪称最核心的技术之一。

固体推进剂稳定性好、机动性强，十分有利于武器装备，大国争相研制，并对技术严加封锁。

在钱学森的指导下，推进剂负责人李乃暨等带着大家从所有能搜集到的资料中捕捉“微乎其微”的线索，硬是凭着几个语焉不详的词组，分析出固体推进剂的研制路径。推进剂专家、后来成为中国工程院院士的崔国良又成功设计出新配方，改良了推进剂的性能。

20世纪七八十年代，推进剂配方研究室时任主任袁人锐主持研制的中能推进剂，支撑起中国第一型固体战略导弹也是第一型潜射导弹“巨浪一号”的发展。

推进剂直冲云天的伟力，也正是它的危险。“在业内，推进剂被称为‘火老虎’，稍微不对它的脾气，引发放炸，它就能顷刻吞噬周遭的一切。”推进剂专家庞爱民说。

过度摩擦、碰撞，都可能引燃推进剂，磨刀石大小的一块就足以将房间夷为平地；高度敏感、易爆，一种纯化状态的关键组分经剧烈摇晃就会爆炸，试管中一点点肉眼不可见的残留，就能将清洗液炸到天花板上。郭峪山峦叠嶂的地形，为推进剂研究提供了天然的“防爆墙”。

其中，配方研制过程中爆炸的概率最高。“做各种配方配比实验，就是摸脾气的过程。”20世纪80年代，高能推进剂配方研制负责人祝一辰总是亲自上手研制配方。

移动运输过程也可谓步步惊心。祝一辰划下红线，转运易爆炸的关键组分时，必须一人持红旗或戴红帽在前方开道，持送人员用左手托量杯底部、右手紧握量杯，随其后小步慢行，将晃动降到最低，也避免进出口和转弯时发生碰撞。

固体推进剂俗称“药”，但这种药不治病，反而有毒。装药车间的工作人员跟它接触久了，会掉发、呕吐、嗓子痒。“不是不知道危险，但国家需要它，再危险也得上。”装药车间退休工人温荣书回忆说。

偏向虎山行，需要勇气和奉献，也需要底气和实力。

“以我们现在对推进剂特性的认识，只要科学操作，严格按照要求做，就不会出现安全事故。”四院固体推进剂研究所时任副所长侯林法反复强调。1989年底，侯林法亲自操作，又抱着合成的反应瓶从六楼走到三楼，用行动证明“降虎之道”。

很快，侯林法又亲手安全合成20克高能固体推进剂原材料。这小小的20克，将中国固体推进剂事业推进了“高能”时代。

始于中国第一代推进剂专家刘国雄、李志刚的“高能”探索，从20世纪70年代起步，战胜了药柱裂纹、脱黏、鼓泡、不稳定燃烧等一众“拦路虎”之后，经全国大协作终于使中国成为世界第二个掌握相关技术的国家，成就了我国固体导弹性能的历史性提高，换来了中国在这一技术领域站到世界最前沿的格局。

四院人是守着山沟沟，取得这些成就的。

那时，在山沟里生活，最怕的是下大雨。有时大雨连下几天，山间处处挂着“瀑布”，裹挟着泥石流冲向马路。“路一断，几天出不了山，蔬菜断了顿，我们就把吃完西瓜剩下的瓜皮炒了当菜吃。”从小随父母在郭峪生活的张华丽说。

自制蜂窝煤、动手磨豆腐、周末上山打柴、用粗水管制作篮球架，一度都是大山里的“时尚”。

子女教育也是难题。自办的子弟学校成了下一代上学的唯一选择，但鲜有专业的老师，多由各研究室轮流派技术人员来充当，讲课方言五花八门。“我女儿从一年级到初中毕业，有8任语文老师、10任数学老师，没有美术老师，没有能识简谱的音乐老师。”四院退休职工成贵斌说。

平出一片山头，建起一排房子就是学校，没有操场、图书馆、实验室，没有山外的大千世界，

四院的子女们从小就接受着特殊的、关于奉献的“言传身教”。

以现在的眼光看，四院人长期“身在苦中”，但他们并“不知苦”。

“那个年代，充满了乐观主义和助人为乐的精神，同事之间互帮互助，处得像亲人一样。”已入耄耋之年的王北海，是固体推进剂研究所的老专家。“我们这代人，证明了中国人不比外国人差，破除了迷信，建立起自信，再怎么艰苦也值了。”

燃尽最后“一口气”，来完成自己的“高光”使命。这是推进剂的“命运”轨迹，它的创造者们最懂。

2022年7月，王北海和同样白发苍苍的老同事们，从襄阳来到西安，参观航天固体动力事业暨四院创建60周年成就展。他们是特殊的观众，因为墙上的事迹、展台里的实物、照片中的里程碑瞬间，都是他们倾尽所能，亲手缔造。

此刻，在展馆内，王北海这位为我国高能固体推进剂研制立下汗马功劳的老前辈，谢绝“功臣”之说，不认“奠基人”之赞，只是微微挥着颤抖的手，含着笑，淡淡说：“我们这辈子，没白活。”

托举长箭啸

1965年年底，王士宝和四院大部队到了内蒙古。

不见诗歌中的“风吹草低见牛羊”，而是“一天进嘴四两土，白天不够晚上补”，粗粝的沙打在脸上如针刺一般。“最要紧的是把科研生产设备盖上、包好，等风沙过去后，再重新擦洗干净。”曾任复合材料研究所所长的刘志学说。

也没有传说中的“牛奶当水喝”，“见不到大米，吃的基本上只有萝卜、土豆、白菜、‘钢丝面’，谁家的粗粮窝窝头没做好，能把地面砸个坑。”王士宝说。

住的是“干打垒”，四处漏风，盖两床被子、穿大衣入睡，依然会半夜冻醒。阮崇智在回忆录中记载：冬天生了炉火以后，屋顶掉泥，床下结霜，掣在墙角的书冻在一起，要用斧子劈开。

可最为艰难的，还是仪器设备和工具的匮乏。“大家冒着随时会燃烧、爆炸的危险，在农家的石碾盘上碾磨化学材料。”1966年分配到四院工作的老职工徐桂林说。

“当时脑子里也没想条件艰苦不艰苦，也没什么心理落差，就是一句话：国家需要，我们就干。”王士宝说。

也正是从那个年代起，杨南生以及后来成为四院院长、中国科学院院士的邢球痕等人着手推进直径1.4米固体发动机的研制，1982年10月12日，“巨浪一号”成功由潜艇水下发射，标志着中国成为世界上第五个拥有潜艇水下发射核导弹能力的国家，具备了二次核打击能力。

第二年，杨南生、邢球痕领衔的直径2米综合试验发动机在四院秦峰三线新基地试车成功，打破了美苏在这一领域的技术封锁和垄断。

同一时期，四院技术装备和工业化水平不断提高，固体发动机生产日益摆脱“小炉匠”式的手工劳动，全面进入精密化大工业生产，甚至有了生产发动机金属壳体的“亚洲第一炉”。

各种捷报都指向同一结论：我国已具备研制大型固体发动机的能力。

20世纪80年代中后期，我国新型远程固体洲际导弹正式立项。四院时任副院长叶定友挂帅指挥，四院人开足马力，研制进展很快。

然而，在一次阶段性试车前夕，发动机出现推进剂明显脱黏现象。脱黏是固体发动机的一大“强敌”，会导致发动机被烧穿甚至爆炸，是多国研究者都曾遇到的难题。解决脱黏难题，有时需要对已经装药固化好的发动机燃烧室进行挖药修复。

所以业内专门有一个岗位——药面整形。整形师傅们要拿着专用刀具，在“火老虎”头上动手术：下刀太快或切得太厚，产生的静电会将推进剂引燃，而“不太厚”的标准是均匀的0.2毫米，铲下的药面拎起来都能透光；手指、手掌、手腕、大小臂、肩部任何一个微小的动作变形，都有可能在端面留下凹痕、不平整等缺陷，进而影响推进剂燃烧状态，导致发动机“一失万无”。

“由于这些严苛的条件，即使是现在众多自动化整形设备投入使用后，依然有部分情

况要依靠人工操作。”四院研究发展部部长董新刚介绍。

而那时，更是一个要依靠技术过硬、经验丰富师傅的关键时刻。装药厂副厂长郝增海、厂里著名的“一把刀”王广仁、后来成为“感动中国人物”的徐立平等20多位师傅组成挖药突击队，从里到外都穿上纯棉制品，脚腕系上一根静电导线，叶定友、阮崇智两位副院长也先后钻进了发动机。

在“火老虎”的胸膛，在比肩膀略宽的芯孔中，以每一刀必须小于0.5毫米的厚度，向脱黏部位逼近。芯孔的上下左右都是推进剂，化学气味过于刺鼻，眼睛也会被熏得酸胀甚至视力模糊，所以每人每次最多只能操作15分钟。

“里面就像另一个世界，安静得让人恐惧。能听见自己的呼吸和心跳声，感觉太阳穴的血管也跟着一起跳，‘噔噔噔’的，震得耳膜疼。”徐立平说。

突击队终于在刀尖上取得了胜利。此后，阮崇智等人经反复研究试验，极大降低了脱黏出现的概率，发动机质量稳步提高。

“攻破一个技术难关可能要耗费数年，一项研制工作可能凝聚着数百人的心血，我们的产品就像自己养的孩子一样。”董新刚说，发现再小的瑕疵，再费劲也要修复，绝对容不下“哪怕0.1颗沙子”。

1999年8月2日，中国新型固体燃料陆基远程洲际战略导弹首发试验圆满成功。10月1日的“世纪大阅兵”中，新型远程洲际导弹方阵压轴出场，自豪地接受全国人民的检阅。

如今，四院的固体发动机已形成覆盖战略、战术、防空、反导及宇航等全应用领域、多尺寸、宽射程、系列化的产品体系。“金牌发动机”用扛鼎之力，助力筑起我国空中、陆上、水下全方位的“钢铁长城”。

2022年3月29日，采用4枚2米2分段固体发动机的我国首型固液捆绑固体动力运载火箭CZ-6改首飞成功，标志着固体动力进入我国主流宇航运载火箭领域。

“都说‘固体动力的春天来了’，我觉得现在不仅是春光明媚，还春暖花开，各项成果百花争艳。”四院发动机研究所所长王健儒感慨。

山高人为峰

其实，你也许早就见过四院的“火”。

2008年5月8日，北京奥运火炬“祥云”登顶珠峰，奥运圣火在前所未有的最高海拔熊熊燃烧，那至关重要的引火器，正是四院的杰作。

珠峰气温-40℃，只有0.3个大气压，氧气稀薄，常年12级大风。引火器就要在这样恶劣的环境下，从圣火灯中引出圣火，还要保证火炬“点得着、看得见、不会熄”，难度就好比在狂风中划燃一根火柴，还要让它燃得旺。

由于我国多项航天工程研制生产过各类航天点火器，四院被选中“挑战不可能”。

攻关组向珠峰发起了一场特殊的“攀登”。为了模拟“风刀霜剑”，他们把电风扇开到最大档，一次次做点火试验；又拿来淋浴喷头，给点火器兜头“浇凉水”……

最终，攻关组交出一款能够自产氧气、持续助燃的引火器，即使将其浸泡在水中也照样能生火点燃，并且燃烧中没有明显烟尘和气味，完全符合“绿色奥运”的理念。经19名登山队员传递，奥运圣火终于燃烧在世界之巅，成为奥运史上的经典一幕。

“高大上”的航天科技，早已深入平常百姓家。

四院研制的固体发动机，助推中国第一颗返回式卫星、第一颗试验通信卫星、第一颗气象卫星在天上“各就各位”，电话、电视、广播、天气预报等才开始走进千家万户，成为百姓生活中不可或缺的一部分。

将推进剂工艺加以改变，便是“四院牌”汽车安全气囊气体发生器；把气囊“穿”在身上，再加上传感器、芯片等，便是能为老年人跌倒提供防护的智能穿戴设备；发动机喉衬材料可用来制作飞机发/炭刹车盘、碳纤维及其他高端精细化工材料可生产成无人机翼、汽车玻璃膜、建筑用窗膜，甚至是输送油气用的陆上海底双金属复合管道；高精度传感器技术转化一下，便有了北京大兴机场高速公路入口的高速动态称重系统；还有固体氧气救生装备、航天智能灭火火装备、各种防腐蚀耐蚀蚀抗冲刷涂料……

“航天科技让生活更美好”，四院一直在

行动。

2019年8月17日，由四院提供全部四级固体主动发动机的商业航天运载火箭捷龙一号首飞成功，这也是首次由四院完成火箭全箭总装总测任务的运载火箭发射任务，是四院拓展商业航天发射市场的又一里程碑。

2020年9月25日，四院旗下有了首家上市公司——陕西中天火箭技术股份有限公司，进一步提升在资本市场的“造血”能力。该公司不仅有增雨防雹火箭，还有从低空、中空到临近空间的探空火箭；不仅填补了我国轻型制导火箭领域的空白，还实现了小型精确打击武器系统和制导火箭出口零的突破。

2022年9月22日，四院成功研制并率先交付国内首个直径3米的新能源锂电铜箔核心装备阴极辊产品，这是继2016年攻克直径2.7米阴极辊，一举打破国外企业垄断后，再次填补国内技术空白。

也是在今年，12月9日，捷龙三号运载火箭在黄海海域腾空而起，将14颗卫星送入预定轨道。这是迄今我国以固体动力为主芯级起飞量级最重、运载能力最大、发射场适应能力最强的固体运载火箭，四级固体发动机全部由四院提供。

“前段时间，我去靶场看了一次试车，现在的条件跟过去比，真是天壤之别。我心里这个高兴啊！”王士宝说。

四院人的工作环境也得到了极大改善。1989年，随着事业发展壮大的需要，四院开始分批搬出大山。固体推进剂研究所，迁到了襄阳市郊；四院大部队历经十余年，于2001年基本搬迁到西安。

近半个世纪南渡北征，外号叫“搬家院”的四院，烙着国家和时代的印迹，辗转半个国，又随着国家和时代的发展，越来越现代化。

“神舟”生命塔

如今，王士宝已年过八旬，背微驼，思维仍然敏捷，说话简短有力，透出当年“王总指挥”的果断与睿智。这些年来，他担任过四院副院长，是中国载人航天工程逃逸发动机项目等多个重大项目的总指挥。

载人航天，一个极端重要的考量便是保障航天员的生命安全，而对科研人员来说，公认“最难的题”也正是关键时刻能带航天员脱离险境的逃逸系统。那是结构极为复杂的动力系统，由5种型号十余台固体发动机组成，其中最主要的10台发动机研制生产任务，落在了四院肩上。

而在四院内部，这回“最难的题”，大概就是异型复杂结构发动机壳体、喷管等的材料和加工工艺。在一些高温部位，喷管要能耐得住超过3000℃的高温，承受得了相当于数千发子弹瞬间齐射的冲击力。

已有的绝热材料不足以扛住这样的“烈火弹雨”。“保障航天员生命安全的逃逸发动机必须具备最高的可靠性，现有材料绝热层的性能达不到要求，那就攻关新的技术路径。”绝热层工艺组组长王庆利说。她是王士宝的大女儿，一直在车间一线工作，当时的她有孕在身，高强度的工作、长时接触化学气体，让她每天都要经历几次剧烈的呕吐。

数十种材料需要遴选，上千次地进行配方组合试验，数以万计的测试数据需要计算比对……终于，应用了新型复合材料和绝热材料的土逃逸发动机，如期站上了试车台。

点火启动，机器轰鸣，白烟腾起，3.2秒的设定工作时间过后，发动机依然稳稳当当地站在那里。位于山间的试车台上，烟尘水汽刚刚散开，一个身影就从百米开外的控制室冲了过去。

他是逃逸系统发动机总设计师陈立学。站在试车架前，陈立学伸出右手，摸了摸发动机喷管的弯管部位。以往，这个部位曾被灼得发蓝，甚至烧穿。

此刻，只见他转过头来，兴奋地朝同志们高喊：“很好！不烫手！哈哈哈……我觉得这次应该成了！”

几天后呈报的检测结果证明，四院的新型壳体材料和绝热材料，真的成了。从神舟一号到神舟十四号，四院研制生产的逃逸系统动力装置参加了全部发射任务，被誉为航天员的“生命之塔”。

不独“神舟”，近年来，“天宫”空间站、“问天”“梦天”试验舱、“天舟”货运飞船“穿戴”着四院研制的舱体全套结构密封系统、机械臂传感器等出征太空，“嫦娥五号”月球探测器、“祝融号”火星车搭载着四院提供的电机组件、特种压力传感器等，获得了月面采样、火星车越障的关键动力。

戈壁深处的靶场试验，也有四院人的贡献。

戈壁滩的夏日“热情似火”，地表温度接近50℃，人连呼吸都觉得灼热，大家喝上几支藿香正气水，继续埋头测参数、铺设备；冬天又“无比冻人”，一些设备都冻得无法启动，大家将这些“冰疙瘩”抱在自己怀里取暖，用已冻得像胡萝卜般红肿的手，将每个部件的位置和角度都安装无误。一次，试验大队就地留下过春节，没有擀面杖，就用甘蔗棒面包了顿饺子。（下转7版）