

十年攻关路 五年飞天行

——首都航天机械公司搅拌摩擦焊的破冰之旅

近日，火箭总装厂——首都航天机械公司《运载火箭贮箱椭球箱底搅拌摩擦焊接技术及装备》课题，荣获了国防科学技术进步一等奖，这是此次一等奖项目中唯一一个属于运载火箭的荣誉。荣誉背后，印刻着该厂十几年来，在搅拌摩擦焊技术研发、工程化应用、标准制定和装备设计领域一次次零的突破，它们将火箭贮箱制造水平推向新的高峰。

第一个整箱应用技术

2014年1月24日，我国第一个3.35米全搅拌摩擦焊贮箱在首都航天机械公司下架。之所以称之为“全搅拌摩擦焊贮箱”，是因为这个贮箱从箱底主焊缝、到筒段纵缝、箱体环缝，均采用了搅拌摩擦焊技术进行焊接。从最初的直线焊接，到空间曲线焊接；从筒段纵缝，到国内首个全搅拌摩擦焊贮箱的诞生……首都航天机械公司不辱“引领航天制造业”的使命，走出了一条由简入难、稳扎稳打的技术攻关路。

搅拌摩擦焊技术，最早起源于1991年的英国，其影响程度堪称一场焊接界的革命。这种焊接接头缺陷少、质量高、变形小，焊接过程环保无污染，在航天产品上应用具有明显优势。首都航天机械公司与搅拌摩擦焊技术的结缘也要追溯到上世纪。

发展航天，运载先行。贮箱是运载火箭上最为重要的结构件。首都航天机械公司是全国最大的运载火箭生产制造基地，也是全国唯一的低温贮箱生产企业，贮箱的焊接技术是该厂的核心技术能力。如果能将先进的搅拌摩擦焊技术在贮箱上应用，将大幅提升运载火箭制造的整体水平。上世纪末，首都航天机械公司开始密切关注搅拌摩擦焊技术的发展，并针对其在火箭贮箱上的应用，开展了各方面的研究。

公司瞄准世界前沿，结合丰富的传统熔焊经验，采用“分步实施、步步为营、风险最小”的策略，将搅拌摩擦焊这个“硬骨头”一点一点啃下来。十年前的一个夏日，公司第一次将搅拌摩擦焊技术应用于筒段纵缝焊接中，并通过了严酷的质量检测。“这是国内第一次将搅拌摩擦焊技术，成功应用于运载火箭贮箱的制造上，其综合技术达到国外同类火箭贮箱搅拌摩擦焊的先进水平，属于国际先进。”专家给出了权威的鉴定结论。

十年后的今天，首都航天机械公司将搅拌摩擦焊技术全面应用于整个贮箱焊接过程中，对箱体环缝搅拌摩擦焊工艺进行优化，初步摸索了关键参数；设计、新制适用于箱体环缝的可回抽搅拌头，满足了箱体环缝的特殊要求，并首次考核了长距离焊接搅拌头的寿命；结合产品结构特点，新制内撑、外箍及轴向压紧工装，确定了全搅拌摩擦焊贮箱的装配焊接工艺流程，装配精度得到了大幅提升。

第一个编制行业标准

在企业界流传着这样一句话：“三流的企业做产品，二流的企业做品牌，一流的企业做标准。”2008年，首都航天机械公司率先编制出国内第一份系列铝合金搅拌摩擦焊航天行业标准，并通过了集团公司的最终评审，为该技术的工程化应用提供了依据。

早在研制首件搅拌摩擦焊试验件时，首都航天机械公司就想到这项技术必须制定工艺标准、检测标准，否则就不可能实现工程化应用。标准就像“百科全书”，不仅是搅拌摩擦焊的工艺参数，而且其核心搅拌头的研制与开发、如何进行焊接缺陷修补、检测手段等问题，都在“百科全书”中给出答案。在国外技术封锁、国内该领域一片空白的“零起点”上，首都航天机械公司由总师系统直接领导，开展大量试验，收集数据、总结经验、广泛调研，征集国内各相关单位意见，经过系统、充分的焊接试验验证后，最终编制出搅拌摩擦焊航天行业系列标准，填补了国内航天系统搅拌摩擦焊技术标准的空白，进一步推动了搅拌摩擦焊技术在航天型号研制、批产中的应用。

此后，首都航天机械公司陆续完成了5项航天行业标准的编制，申报国家、国防发明专利12项，曾获得国防科学技术进步二等奖2项，并将大量研究成果归纳总结、梳理提炼，出版了我国第一部系统论述铝合金搅拌摩擦焊技术的著作——《铝合金的搅拌摩擦焊接》。

理论从实践中提炼而来，又继续指导并推动着应用的发展。如首都航天机械公司搅拌摩擦焊的超声相控阵检测，从最初的离线手动检测升级为在位自动化检测，大大提升了效率；摩擦塞补焊的探索，为缺陷修补提供了思路。如今该厂已形成集“搅拌摩擦焊工具研制”、“搅拌摩擦焊接工艺研发”、“搅拌摩擦焊无损检测及标准

制定”、“大型非标搅拌摩擦焊装备研制”、“型号产品工程化应用”等于一体的搅拌摩擦焊技术发展体系，为搅拌摩擦焊技术在型号上的应用提供了坚实的保障。

第一个经受飞行考核

对于航天领域，一项新的技术只有走出实验室，飞上蓝天，才算真正实现工程化应用。2009年，由首都航天机械公司生产总装的长三丙遥三火箭成功发射升空。这发火箭的贮箱纵缝首次应用了搅拌摩擦焊技术，是该项技术在航天领域第一次接受的“真刀真枪”的飞行考核。

一如该厂的战略规划，完成搅拌摩擦焊航天行业标准制定后立即着手将其推向工程化应用，以此带动贮箱制造水平的整体提升。

然而，这项新技术非常“年轻”，而我国长征系列现役运载火箭的各项设计参数、焊接方法早已稳定，即使只在一种焊缝上应用搅拌摩擦焊，也要面临未知的挑战，承受巨大的压力。团队里每名成员的工作更加认真仔细，交出了漂亮的成绩单：火箭贮箱筒段纵缝焊接一次合格率高达90%以上，接头性能大幅提升……经过现场评审，金牌火箭长三甲系列的型号总师、设计人员对搅拌摩擦焊的质量深感满意，一致同意在长三甲火箭的一二级贮箱上使用搅拌摩擦焊技术，进行飞行考核。

自此，厂开启了搅拌摩擦焊进行飞行考核的征程，并总结出“成熟一个、推行一个”的工程化应用模式，即搅拌摩擦焊技术在何种焊缝上使用具备条件，就立马从攻关团队转向生产班组，在设计人员的支持下，进行飞行考核。这种模式缩短了新技术推广应用的周期，同时也打造了一支科研与生产完美结合的“精兵强将”队伍：由集团公司首席焊接专家把握方向，一批技术专家作具体技术支撑，带领着高学历的技术骨干，同时搭配特、高级技能人员，整个队伍层次分明、搭配合理。2009年至今，首都航天机械公司已经先后实现了火箭贮箱纵缝、箱底纵缝、箱底全搅拌摩擦焊的工程化应用，并多次刷新了搅拌摩擦焊在国内航天领域的“飞行成功纪录”。

第一个研制5米级装备

搅拌摩擦焊技术的大面积应用是一个趋势，但只有具备自主设计研发装备的能力，才能走上独立的技术发展之路。2014年初，首都航天机械公司自主设计研制的第一台5米级纵缝搅拌摩擦焊设备安调到位，即将为搅拌摩擦焊技术的进一步推广发挥作用。

在研究搅拌摩擦焊工艺技术的前期，首都航天机械公司“土法上马”，以一台熔焊装备为基础，成功改造成为了第一台搅拌摩擦焊设备。这不仅解决了设备从无到有的问题，而且成为工艺技术摸索研发的坚实保障。后来，伴随搅拌摩擦焊技术顺利通过飞行试验考核，这台设备也成功经受了考验。

为实现搅拌摩擦焊在长五火箭筒段上的应用，2009年，首都航天机械公司从国外引进了一台搅拌摩擦焊纵缝焊接设备，可以加工2.25米、3.35米和5米直径贮箱的纵缝，极大地提升了贮箱纵缝生产的能力。但是该厂并不满足于此，设备安调时，工装设计人员与国外工程师主动沟通，结合生产实际，将学到的经验消化吸收再创新，成功设计出航天领域的第一台5米级纵缝搅拌摩擦焊设备。这台搅拌摩擦焊设备比国外引进的设备自动化程度更高，刚性更强，结构优化，焊接过程更加稳定，而且完全由首都航天机械公司独立自主设计开发出来。后续，首都航天机械公司又生产了两台设备并交付使用。

近两年，某新型号贮箱要采用全搅拌摩擦焊技术。在工艺技术紧张摸索的同时，首都航天机械公司同时启动了箱体总装环缝搅拌摩擦焊装备的设计。因为要保证产品总装的尺寸公差要求等，必须采用全新的结构、全新的驱动方式、焊接方法和控制系统。公司采取项目负责制的方式，组织了专项团队，现已完成方案的全部设计工作，进入装备的制造总装阶段，预计在6月交付使用。尽管目前厂已经实现了全国首个全搅拌摩擦焊贮箱的生产，但结构更复杂的法兰盘要实现搅拌摩擦焊，还需要更加高级的五轴联动搅拌摩擦设备才能实现。首都航天机械公司正在通过战略合作的方式，与其他单位联合开发，现已完成五轴联动搅拌摩擦焊主机的方案设计，并初步通过评审。现在，首都航天机械公司已独立自主完成了多项试验专机开发、搅拌主轴和搅拌头的设计开发等，真正具备了大型搅拌摩擦焊设备的开发能力。

十年攻关路，五年飞天行。对于搅拌摩擦焊这项技术的开发与应用，首都航天机械公司经历了很多的“第一次”，也在航天甚至全国开创了很多的“第一次”。首都航天机械公司保持着这份破冰的勇气和魄力，要在搅拌摩擦焊的创新研发与工程应用之路上走得更远。

（首都航天机械公司 吴思）