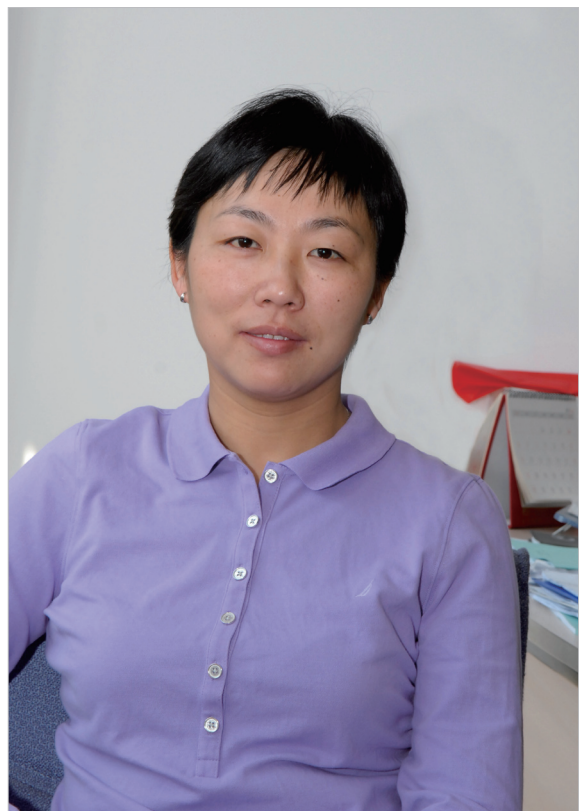


航空特种焊接技术： 厚积薄发 破茧成蝶

——访中航工业北京航空制造工程
研究所航空发动机工艺研究室主任李晓红

Development of Special Welding Technology for
Aviation Industry

本刊记者 杰 一 叶 枫



✦：航空特种焊接技术体系是航空制造领域中一个重要技术群,是航空材料形成零件和零件成为产品的桥梁,请您简要介绍下国内外航空焊接技术的发展动态和成果应用情况。

李晓红：航空特种焊接技术是伴随着航空技术和航空产业的发展而不断进步的。国内外为满足先进航空装备对性能提升的要求,在构件研制过程中采用了大量的新材料和新结构,这促进了焊接技术的发展。近 70 年以来,航空材料逐渐从以铝合金为主导的材料体系过渡到以钛

合金、复合材料为主导的材料体系(表 1),航空结构逐渐向整体化、轻量化、高可靠、长寿命结构过渡。伴随着这些变化,航空特种焊接技术经历了从气焊、弧焊、电阻焊、钎焊、扩散焊等传统焊接方法到高能束流焊、摩擦焊等新型焊接方法的不断发展,同时也促进了传统焊接方法的不断拓展。尤其在近 20 年以来,以高能束流焊、搅拌摩擦焊、超速成形扩散焊、过渡液相扩散焊、线性摩擦焊等方法为代表的先进焊接技术在新一代飞行器和高推重比发动机制造中大放光彩,焊接出了以整体壁板、整体叶

盘等为代表的具有典型四代装备特征的先进构件,为先进航空装备的更新换代、快速响应制造奠定了坚实的基础。

这里主要谈谈目前在新型航空飞行器和动力系统中,与我们研究室相关的几种典型焊接技术的国内外发展动态。

(1) 扩散焊技术。以过渡液相扩散焊(TLP)和放电等离子扩散焊为代表的焊接新技术是高推重比航空发动机热端部件采用的典型焊接技术。过渡液相扩散焊方法吸纳了传统固相扩散焊和钎焊的各自工艺优点,在满足高合金化新材料的高强度连接的前提下,可以大幅降低对焊接压力和零件装配间隙的要求。美国 IHPTET 计划中提到的单晶对开叶片、多联高涡叶片、多孔层板结构等都采用了过渡液相扩散焊方法实现了上述复杂构件的高性能连接。美国 GE 公司将该技术成功用于镍铝单晶叶片焊接,获得的接头性能与基体相当。PW 公司将该技术用

表1 飞机机体和发动机用材料

阶段	年代	机体材料	发动机材料
第一阶段	1903-1919	木材、布纤维	钢
第二阶段	1920-1949	铝、钢	铝、钢
第三阶段	1950-1969	铝合金、钛合金、钢	高温合金、铝合金、钛合金、钢
第四阶段	1970-20 世纪末	铝合金、钛合金、钢、复合材料(以铝合金、钛合金为主)	高温合金、钛合金、钢
第五阶段	21 世纪	铝合金、钛合金、钢、复合材料(以复合材料为主)	高温合金、钛合金、钢、复合材料

于氧化物弥散强化合金 MA956 多孔层板结构制造,并用作 F119 发动机加力燃烧室和尾喷管隔热内衬的制造。航空制造研究所率先于 20 世纪末开发出了这种新型焊接方法,并在 IC10、MGH956、二 / 三代单晶等新型高温材料上实现了可靠连接,同时配套研制了用作过渡层的焊料,成果已应用于高推重比发动机的关键零件的研制中。放电等离子扩散焊是由放电等离子烧结发展演化而来,其基本原理是将脉冲大电流直接通入试件或者模具中进行加热,从而实现高性能焊接。该技术在陶瓷、CMC、粉末合金等耐高温材料及其构件的同种或异种材料连接方面,具有广阔的应用前景。

(2) 摩擦焊技术。以线性摩擦焊和惯性摩擦焊为代表的焊接技术是实现高推重比发动机转子部件不可或缺的先进焊接技术,是利用材料接触面之间的相对运动所产生的摩擦热及塑性变形热,使待焊件接触面及其附近区域达到粘塑性状态并产生塑性变形,通过相互扩散、动态再结晶而实现连接的方法。线性摩擦焊是针对第四代航空发动机整体叶盘结构制造、修理而发展起来的一种先进摩擦焊技术,因其具有接头性能优异、焊件尺寸精度高、可焊材料覆盖面广、工艺适应性强、焊接过程易实现工程化、绿色焊接等优点而备受国内外先进航空发动机制造青睐。Typhoon 战斗机发动机 3 级低压压气机、F119 发动机风扇和压气机 1~2 级, F135 发动机升力风扇和 1、2 级风扇均采用了线性摩擦焊整体叶盘结构。航空制造研究所于 20 世纪初期开展了该技术的研发,从原理设备的自主研发着手,经过十多年的发展,目前已具备了工程设备研制和整体叶盘结构焊接制造的综合能力,为高性能发动机的发展奠定了技术基础。惯性摩擦焊作为焊接高性能航空发动机整体转子部件主导的、典型

的和标准的工艺方法,可以解决某些结构传统工艺无法加工的难题,是最为可靠、再现性最好和最可依赖的焊接技术,主要应用包括高压压气机转子部件、低压钛合金转子组件、发动机风扇轴以及飞机的双金属铆钉等的焊接。美国 MTI 公司在惯性摩擦焊设备的研制方面一直居于世界前列,各大发动机制造公司配备了该公司不同吨位的焊接设备用于制造不同型号的发动机转子部件,目前最大的设备可达 2000 吨的水平。在高性能高推重比发动机上,采用摩擦焊焊接结构,不仅可进一步促进关键构件轻量化,保证关键构件的可靠性,改善构件可制造性、可修复性,提高材料利用率,减少加工工时,降低制造成本,并可为关键构件的结构设计提供新的制造途径和手段,对提高新型发动机性能具有重要意义。

(3) 钎焊技术。从微小精密构件的制造到大面积薄壁构件的制造,从非承力构件到次承力构件甚至主承力构件的制造,从常规材料到高温新材料、陶瓷等非金属材料的连接,体现出了钎焊技术伴随航空部件制造要求的不断提高而推陈出新的发展提升。钎焊技术是一项精密的焊接技术,在航空、航天、电子等军、民用行业应用非常广泛,只要钎料和钎焊方法选择得当,可使接头做到无需加工却能“天衣无缝”,这是其他焊接方法难以实现的。先进航空结构的钎焊一般采用真空整体加热,因此工件的相对变形量以及钎焊接头的残余应力比熔焊等方法小很多,更易于保证工件的精密尺寸。欧美和俄罗斯等国在其先进航空发动机的静子叶环、蜂窝封严结构、耐磨镶块、热端部件大间隙修复、导管等结构中普遍使用钎焊技术,在其先进飞机机身蒙皮结构、发动机舱门、短舱消音声衬以及高速飞行器的翼、舵面耐 / 隔热结构中采用了大面积蜂窝夹层结构的钎焊技术。国内在航空 / 航天

飞行器和动力系统中也广泛采用钎焊技术。近年来,以航空制造研究所为代表的研发团队,在金属蜂窝壁板结构的钎焊技术方面进行了系统的研究和大面积钎焊构件的研制,研发的整体部件已在多种飞行器上得到了应用验证,技术水平已达到国际先进水平,为钎焊技术的发展开拓了新的应用领域。

(4) 气体保护焊技术。由于高能束流焊接和搅拌摩擦焊接的迅猛发展,以钨极氩弧焊为代表的气体保护焊技术的发展在航空领域俨然陷入了尴尬的境地。一方面,作为一项传统的高性能焊接技术,因其工艺适应性强、制造成本低、应用面广而在制造部门成为不可或缺的手段;另一方面,由于高能束流能量密度高和搅拌摩擦固相连接的先天优势而在新型整体结构的研制过程中处于“旁观者”地位,最多也只能充当“替补”的角色,近十年以来的发展陷入低迷。以乌克兰巴顿所和英国 TWI 为代表的国际焊接机构也只能在活性焊剂焊接、超音频焊接、电弧激光复合焊接等方面开辟蹊径,虽有所起色,但其获得的成果也只能湮没在高能束流焊接以及搅拌摩擦焊接蓬勃发展的声浪中。然而,作为传统熔焊技术中最具性价比、综合学科涵盖最全、发展历史最长的优质焊接技术,气体保护焊工艺方法的广泛适应性及其技术成熟程度、接头组织形态研究的充分、接头无损检测方法的标准化和接头应力变形计算分析和控制手段的完善等,使得该技术“破茧成蝶”的势头是不容忽视的。航空焊接结构完整性技术的发展和体系的搭建,从某种程度上说,也应当以气体保护焊技术为着力点和出发点,才有可能把以断裂力学为基础的、以焊接接头几何不完整性、组织不均匀性以及力学不连续性为普遍特征的焊接结构完整性研究引入适用的、合理的轨道中来,才有可能为航空焊接构件的可

靠设计、安全评估与寿命分析奠定坚实的基础。

：航空特种焊接技术是航空发动机工艺研究室一个重要专业方向,请详细介绍一下近年来您带领的科研团队在航空特种焊接技术领域的学术研究、关键技术突破及工程应用等方面取得的成果。

李晓红:航空发动机工艺研究室的航空特种焊接技术主要包括气体保护焊、钎焊、扩散焊和摩擦焊等方向。

气体保护焊方向,在先进焊接技术开发、钛合金焊接、焊接变形控制等方面取得了卓有成效的成果,并始终处于国内领先地位。比较突出的几项工作有:开发的系列“静态”和“动态”低应力无变形焊接技术、预变形控制技术等应力变形控制方法已经应用到航天火箭燃料储箱和发动机机匣等产品的焊接制造;将“动态”低应力无变形焊接技术和设备提供给英国 TWI 用于工程应用研究与开发;突破了钛合金焊接缺陷控制技术,形成了导弹筒体等航空钛合金产品的专业化生产能力;突破了钛合金和不锈钢等材料的活性焊剂技术,形成了系列焊剂产品,采用该技术制造的大型钛合金储箱已经在航天型号装机应用;突破了航天服薄壁复杂整体焊接结构的精密焊接和接口尺寸控制等多项关键技术,成功地实现了我国舱外宇航服的自主研制,填补了国内空白,达到了国际先进水平,研究成果满足了“神七”的载人飞行任务要求,成果进一步在“飞天”舱外航天服主体结构研制中采用,目前已完成前期试验考核。

钎焊方向,重点研究了钛合金、高温合金、钛铝化合物、陶瓷及其复合材料等材料的高强度钎焊技术,采用多相复合等设计技术研制了多种钛基、镍基、钴基钎料,申报国防发明专利 2 项。突破了大尺寸、变曲率金属蜂窝夹层结构的蜂窝芯体加工、焊

接装配、钎焊及无损检测技术,实现了飞行器舵翼面结构、进气道消音蜂窝结构的制造并装机应用;突破了刷式密封结构防干涉排丝、精密焊接、柔性内孔加工等技术,实现了刷式密封环结构的装机应用;突破了功能陶瓷材料与金属材料的钎料研制及焊接结构优化技术,开展了陶瓷基复合材料与高温合金的耐高温、抗氧化钎焊及质量控制技术研究,为透波结构和热端部件的工程化技术升级提供了有力支撑。

扩散焊方向,重点研究了镍基单晶、 Ni_3Al 化合物、氧化物弥散强化合金(ODS)等高强度过渡液相扩散焊(TLP)技术,研制出多种镍基、钴基中间层焊料,申报国防发明专利 5 项;研究了脉冲大电流作用下,利用等离子体活化界面、焦耳热实现对界面的局部高温加热、脉冲电流促进原子扩散和塑性变形的新型加工方法,实现了金属/金属、金属/陶瓷的快速固相扩散焊接和陶瓷耐磨层的快速烧结;采用扩散焊技术研制的发动机涡轮导向叶片组件、航天液压伺服阀射流盘组件等构件,实现了装机应用;研制的多孔层板火焰筒通过台架试验考核,并获得国防科学技术进步奖二等奖。

摩擦焊方向,重点开展了线性摩擦焊工艺及其专用装备的技术研究与工程应用开发。在线性摩擦焊技术领域,航空制造研究所一直处于国内领先地位。在国外技术封锁、国内技术基础薄弱的情况下,相继自主研制出中、大吨位的线性摩擦焊试验设备,并以设备为依托,开发了航空发动机整体叶盘用钛合金的线性摩擦焊及其热处理技术等,申报发明专利两项;开展了针对异种材料钛合金线性摩擦焊的产热机理及温度场形成与演变规律等机理研究,搭建了焊接接头组织、性能、微观机理等数据库,部分研究成果处于国际先进水平;打通了线性摩擦焊整体叶盘研

制的技术路线;目前正在积极开展单晶、粉末高温合金、钛铝金属间化合物等新材料的线性摩擦焊工艺研究以及针对飞行器结构的工程应用研究;研究成果必将推动线性摩擦焊技术在高推重比发动机和新一代飞行器关键结构中的应用,也必将为航空新型装备的性能提升、结构优化设计提供有效的技术途径。

：作为一个科研团队领导,请您谈谈在科研管理与带领团队保持强劲技术创新力方面的体会?

李晓红:我所在的科研团队承担着航空飞机、发动机相关的各类基金、预研和型号攻关等科研项目,科研水平的不断提升和科研成果的工程应用是研究室发展壮大的重要途径之一,而科研管理水平直接影响着科研工作的进展和完成效果。基于任研究室主任 8 年以来的经历,在科研管理方面主要有以下几点感受和体会:

(1)管理工作需要敬业和奉献精神。作为一名基层的管理者,“以身作则”是基本要求,要构建蓬勃向上、团结拼搏的团队,管理者的身体力行非常关键。几年来,我每天工作基本都在十个小时以上,上班时间除了处理各种业务以外,下班以后还必须为第二天的工作及与研究室长期发展相关的工作做好计划和规划。“作为年轻的管理干部,勤政敬业是成长的必由之路”。我坚信:机会只会提供给那些有准备的人。研究室要发展,首先,主任必须要勤奋。也正因为这份努力和执着,我们的团队在成功和挫折中经受了一次次的历练,愈挫愈勇,不仅收获了创新、创业的激情和希望,还成长为一支敢于拼搏、能打硬仗、勇于攻坚、团结奋进的斗志昂扬的队伍,为部门的后续长远发展创造了良好的氛围。

(2)重视技术带头人的作用和后继者的培养。航空制造研究所的立所之本在工艺,工艺的硕果在于知

识和经验的累积。技术带头人是各个专业团队经过长期培养和锻炼而成长起来的,具有丰富的科研和工程实践经验,在科研团队中具有举足轻重的作用。我们必须提供平台和机制,让他们在技术创新和后继者的培养上施展才华,不仅让他们能承担起与自身能力相匹配的责任,更要让他们有足够的空间和团队可以实现技术的创新以促进专业的发展。研究室以基础院首席为代表的几位焊接专业技术带头人,在各自的技术方向上勇于创新、敢于突破、严以带徒。不但开发出了线性摩擦焊和过渡液相扩散焊为代表的焊接新方法,而且搭建出了各自的技术人才梯队,为专业的持续长远发展奠定了基础。

(3) 加强团队建设,激发个人潜能,才能使团队保持强劲的技术创新能力。根据研究室技术专业特点和发展的需要,经过充分斟酌和讨论,将焊接专业划分为研发部和工程部。其中,研发部又分为3个部,研发Ⅰ部主要承担钎焊、扩散焊、熔焊技术相关的预先研究、技术开发和型号攻关任务,是整个焊接大专业的“孵化器”。专业方向发展成熟一个、独立一个,未来将不断增多研发分部的编制;研发Ⅱ部主要承担金属蜂窝壁板结构研制相关的预先研究、技术开发和型号攻关任务;研发Ⅲ部主要承担摩擦焊技术相关的预先研究、技术开发和型号攻关任务;工程部主要承担型号产品生产和过程质量控制。选拔工作责任心强、团队合作好、科研能力和水平有发展潜力的年轻技术骨干担任部长,明确责任、权利、义务及奖惩办法,通过技术、思维和管理上的大胆创新,以期点燃团队激情,传递责任和压力,激发成员个人潜能,最大限度地实现“人尽其才”。

☞: 您认为在我国未来航空武器装备研制中,航空特种焊接技术会面临哪些机遇与挑战? 你们团队会在哪些方面开展新技术探索以满足

新一代武器装备发展?

李晓红: 近年来,大飞机、空天飞机、无人机、先进战机的研制与生产推动了航空特种焊接技术的发展。航空特种焊接技术在航空制造技术体系中发挥着越来越重要的作用。它已由原来的辅助制造工艺演变成成为飞机制造中的主导工艺方法之一。可以说,航空特种焊接技术已经步入了快速发展期,为了满足不同的需求,新技术、新方法层出不穷。同时,航空特种焊接技术自身的发展和完善,也为新型先进飞机的结构设计和制造提供了技术保证。

但是,与世界发达国家的航空焊接技术水平相比,我国航空焊接技术还有很大的差距,这需要航空焊接工作者付出更多的努力。结合我们团队的主要研究方向,未来将主要在以下3个方面开展相关的研究工作:

(1) 航空新材料的焊接技术。

新一代飞行器及其动力系统将采用大量的新材料,焊接技术的突破是新材料推广应用的关键之一。结合团队的自身特点,未来将重点突破钛铝金属间化合物、陶瓷及其复合材料、钕合金等的钎焊,第三/四代镍基单晶、ODS合金、镍铝金属间化合物、钕硅金属间化合物等的TLP扩散焊,钛基复合材料、单晶/粉末合金、陶瓷及其复合材料/金属等的放电等离子扩散焊,以及高强钛合金、钛铝金属间化合物、高温合金等的线性摩擦焊技术,为航空装备用焊接关键件的制造奠定技术基础。

(2) 航空轻量化、整体化结构的焊接技术。

减重一直是航空人永恒的追求目标。有数据表明,在航空发动机减重方面,制造技术和材料的贡献率占70%~80%。其中,焊接技术的进步是实现航空结构轻量化的必由之路。与此同时,航空结构设计正在向整体化方向发展,采用焊接方法把不同材料、形状、结构和功能的零部件按

“以小拼大”的方式连接成一个复杂的整体,大大简化构件整体加工的工序,可以节省材料和成本,提高生产效率。因此,航空特种焊接技术在飞机及发动机轻量化、整体化结构的制造方面将发挥不可替代的作用。未来,团队将在金属蜂窝夹层结构、整体叶盘和整体叶环结构、离心叶轮等轻量化、整体化结构方面开展焊接、加工、无损检测等技术的系统研究工作,以满足新型航空装备研制的需要。

(3) 航空焊接结构完整性研究。

焊接结构完整性的研究与应用是目前航空结构制造领域的又一重要发展方向。焊接接头本身所固有的不完整性(主要表现为冶金组织不均匀性、力学性能不连续性和几何不完整性以及焊接残余应力等)会对整体结构使用的安全性和可靠性产生重要影响。焊接结构完整性是指焊接结构及其零件与部件在设计寿命内服役时不间断执行预期功能的能力,它包含了焊接结构与构成结构的部件在强度、韧性、刚度、尺寸稳定性及准确性、损伤容限、耐久性、检测标准及维护系统等方面的综合要求。未来,将针对飞机壁板、整体叶盘、涡轮叶片等典型焊接结构,重点在焊接结构失效分析、复杂工况下的结构完整性评估方法,以及典型结构的断裂力学性能测试、结构件的疲劳和断裂性能验证试验等方面开展研究工作,以满足在研焊接构件的可靠性设计以及在役焊接构件的再设计、再制造和延寿等需求。

新一代航空装备的蓬勃发展为焊接技术提供了机遇和挑战,作为焊接工作者,我们应当抓住机遇、迎难而上,厚积薄发,持之以恒地以优质焊接技术推动我们的航空强国梦实现;破茧成蝶,不懈努力地推陈出新,以实现航空特种焊接技术的创新突破发展。

(责编 叶枫)