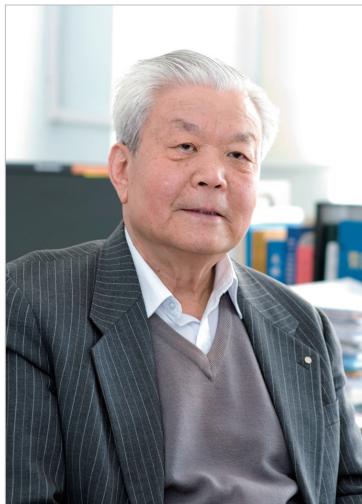


航空特种焊接 / 连接技术体系的形成和发展

——中航工业北京航空制造工程研究所建所 55 周年纪念

Formation and Development of Aviation Special Welding/Connection Technology System

中航工业北京航空制造工程研究所 关 桥 邵亦陈



关 桥
焊接专家,“低应力无变形焊接”理论创始人,中国工程院院士、中航工业北京航空制造工程研究所研究员。

“十二五”国家战略性新兴产业发展规划要求,高端装备制造业要大力发展现代航空装备业;航空特种焊接/连接技术是现代航空制造业的一个重要组成部分。高速、高温、极端环境下服役的飞行器及其动力装置需要轻量化、长寿命、高可靠性的结构以及与之相匹配的高性能材料和整体化低成本制造技术,航空特种焊接/连接技术应运而生。随着一代又一代新型飞行器及其动力装

在我国,航空特种焊接/连接技术的研究,始终瞄准国际高端制造业发展的前沿,也引领着机械制造业中的焊接技术的创新发展;同时,航空特种焊接/连接技术的工程应用领域日趋扩大,不断向国民经济的其他产业部门转移,发挥着更大的技术、经济和社会效益。

置的发展,不断地开发出新型的焊接/连接方法和技术,研制出精密、自动化的特种焊接/连接/加工装备作为新方法和技术的载体,满足航空新产品发展的需求。

在我国,航空特种焊接/连接技术的研究,始终瞄准国际高端制造业发展的前沿,也引领着机械制造业中的焊接技术的创新发展;同时,航空特种焊接/连接技术的工程应用领域日趋扩大,不断向国民经济的其他产业部门转移,发挥着更大的技术、经济和社会效益。

航空特种焊接 / 连接技术体系的建立和发展态势

新型飞行器的设计和轻金属(铝合金、钛合金)结构的扩大应用,动力系统性能的不不断提升与高温材料和功能部件的采用,均牵引着航空特

种焊接/连接技术的快速创新发展;而在这些结构和部件的整体化和低成本制造中关键的和核心的焊接/连接技术的突破,又不断地推进新结构的设计构思和新材料的优化选用。

20年前,我们曾对20世纪下半叶以来的航空特种焊接/连接技术的发展趋势做过预测,如图1所示。

近20年来的实践也显现了图1预测发展趋势的前瞻性。航空特种焊接/连接技术发展和应用的大趋势表明高能束(尤其是激光束、电子束)焊接/加工技术正在逐步扩大应用,如图1所示。它在各类金属材料熔化焊接方法的发展中独占鳌头;而固态连接技术(含钎焊/扩散焊、过渡液相连接技术)尤其是超塑成形扩散连接技术和摩擦焊技术同样也在扩大应用范围(见图1)。高能束焊和固态焊这两大方向的创新发

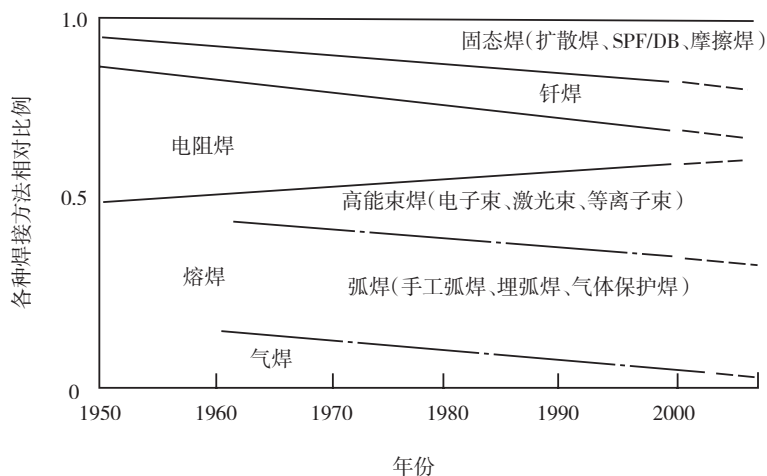


图1 各类航空特种焊接技术的发展趋势

注：出自关桥的《航空特种焊接技术的发展》，收载于1997年出版的《北京航空制造工艺所建所40周年论文集》和2002年出版的《关桥论著选编》。

展正在解决着航空制造工程中新出现的“特需”的和“关键”的技术难题，为结构设计师们提供了更多创新思维的空间和注入新的结构理念。

中航工业北京航空制造工程研究所(以下简称625所)建所以来的半个世纪,航空特种焊接/连接技术的发展历程也印证了图1中所给出的发展趋势。

1958年,在625所(早期为航空工艺研究所)成立了热加工研究室,“焊接”只是其中的一个小组;在图2上把它显示为大树根部的一颗小树苗,经历了半个世纪的成长现在已傲然挺立为参天大树——具有4个大专业分支的航空特种焊接/连接技术体系,直接从事研究和开发的科技人员约120余人,分布在4个研究室内。

从图2左侧的年代标尺上可知:第一阶段(1958~1961年)为焊接专业研究室筹建过程,第二阶段(1961~1978年)为专业发展和学科建设时期;第三阶段(1978年至今)形成了分布在4个研究室内的焊接/连接专业分支及重点实验室和发展研究中心的规模建设和发展。

这棵参天大树的成长记录显示:1979年将研究室定名为“航空

特种焊接技术研究室”;

1986年将超塑性成形/扩散焊接专业单列为一个专业研究室;

1993年建立了“高能束流加工技术”国防科技重点实验室;

1994年正式把与焊接/连接相关专业划入3个专业研究室:

(1)发动机工艺研究室(102室): 包涵有气体保护焊、钎焊、扩散焊、过渡液相连接、摩擦焊、结构完整性和应力变形控制;

(2)高能束流加工技术研究室(104室): 包涵有电子束、激光束及等离子体、离子束加工技术;

(3)金属钣金成形技术研究室(106室): 包涵有超塑性成形/扩散连接技术。

2002年建立了中国搅拌摩擦焊中心并注册了专业化技术公司——北京赛福斯特技术有限公司,2006年成立搅拌摩擦焊研究室(107室)。

经历了建所以来55年的发展,航空特种焊接/连接技术体系已初具规模。该技术体系专业分类和构成如表1所示。无论是熔焊、钎焊,还是固相焊接技术,其终极目标都是保障飞行器焊接结构的完整性,并在焊接制造过程中控制焊接应力与变形(见表1, I)。

在航空结构制造工程中,气体保护焊(见表1, II),尤其是氩弧焊接技术及其自动化与精密控制,仍然是焊接制造工作量的主体。而电阻焊(见表1, IV)因其多采用搭接接头,振动疲劳载荷的应力集中系数大于熔焊的对接接头,在当代的飞机和发动机结构设计中已很少再选用电阻焊接头形式,在航空制造中日趋减少(见图1)。

钎焊,尤其是高温钎焊(见表1, III),在新型高性能动力装置和高速、超高速飞行器结构的制造中发挥着独特的技术优势,如用于热端部件和蜂窝壁板的制造等。随着先进推进系统的发展,异种金属材料、陶瓷与金属、金属间化合物、定向凝固和单晶叶片、气膜冷却复杂结构的高温零部件的制造越来越依赖于特种钎焊连接与过渡液相(TLP)连接技术(见表1, III)的创新发展。

下面将重点叙述航空特种焊接/连接技术体系中日益扩大应用的2个重要分支:(1)高能束流焊接/连接与加工技术(见表1, V);(2)固态焊接/连接技术(见表1, VI)的创新发展。

标志性技术进步与专业建设

在我国,纵观半个世纪以来飞行器结构的设计/选材/制造三位一体的科技进步,特种焊接/连接技术持续的创新研发与应用,引领并支撑了新型结构设计理念的更新,保障了新型轻金属(铝合金、钛合金)的扩大应用及先进材料的功能得以实现,为飞行器结构的高质量、轻量化和整体化、低成本制造及焊接结构完整性和服役中的可靠性提供了重要手段。

在过去的55年间,为实现飞行器结构整体化与低成本制造,在特种焊接/连接技术体系中,突出地彰显了高能束焊接/连接技术和固态焊接/连接技术(见表1, V和VI)这两个前沿领域的扩大应用和创新发展,

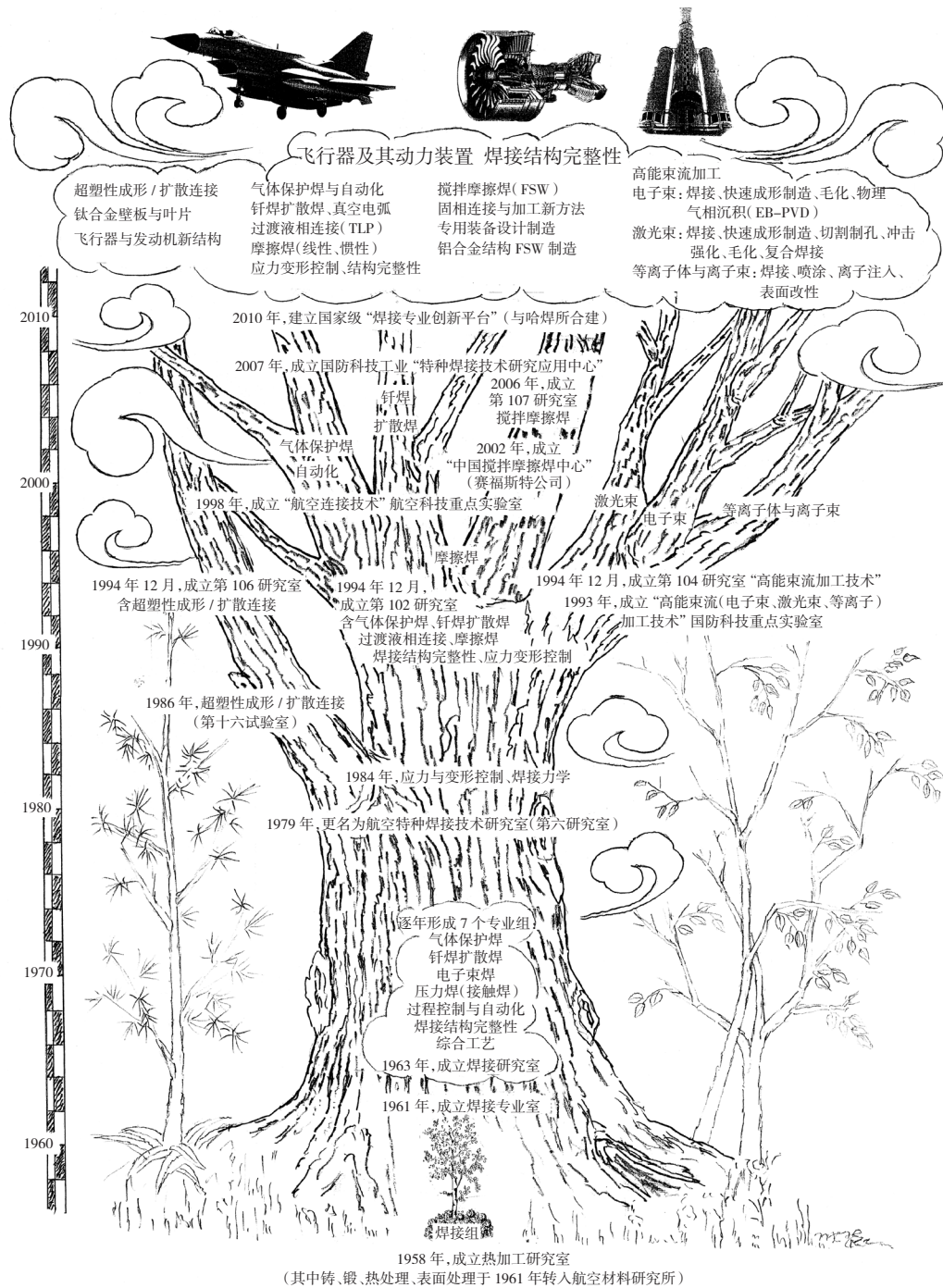


图2 航空特种焊接/连接技术体系在625所的成长历程

注: 出自关桥 2010 年 10 月为航空工业创建 60 周年的撰稿《航空特种焊接 / 连接技术体系的发展与构成概述》, 该文刊载于由航空工业出版社于 2011 年 4 月出版的《生命之光》附录 3。

如图 1 所示。国际上,在这两个前沿领域技术进步的历程中标志性的亮点有 4 个:

(1) 20 世纪 60 年代,电子束焊接 (EBW) 用于飞机和发动机钛合金重要承力结构的整体化制造,减轻重量,降低成本;

(2) 80 年代,钛合金超塑性成形 / 扩散连接 (SPF/DB) 技术在飞机设计与制造中崭露头角,用于飞行器和发动机结构的整体化制造,减轻重量,降低成本;

(3) 90 年代,激光焊接 (LBW) 用于轻金属飞机带筋壁板结构等重要

承力结构的整体化制造,减轻重量,降低成本;

(4) 进入 21 世纪初,搅拌摩擦焊 (FSW) 用于飞行器壁板、梁、框等铝合金重要承力结构的整体化制造,减轻重量,降低成本。

自 20 世纪 60 年代,特种焊接 /

表1 航空特种焊接/连接技术体系的构成与分类

航空特种焊接 / 连接技术体系的构成与分类				
I	焊接结构完整性与应力变形控制			
II	气体保护焊与自动化			
III	钎焊,过渡液相连接(TLP)			
IV	电阻焊(接触焊)			
V 高能束流焊接与材料加工	V-1	电子束		
	V-2	激光束		
	V-3	等离子体与离子束		
VI 固态焊(固相焊)	VI-1	扩散焊(扩散连接,过渡液相连接-TLP)		
	VI-2	超塑性成形/扩散连接		
	VI-3 摩擦焊	VI-3-1	惯性摩擦焊	
		VI-3-2	线性摩擦焊	
		VI-3-3	搅拌摩擦焊	

连接技术体系在 625 所的发展步伐与国际轨迹一脉相承,从望其项背的水平发展到如今的在某些方面处于并驾齐驱的态势。尤其是在高能束(电子束、激光束)焊接/连接/加工技术和固相连接技术这两个领域,正在缩小差距,以自己的创新发展瞄准前沿迎头赶上。以下是在我国航空特种焊接技术体系形成和专业建设中具有标志性的几个亮点。

(1) 高能束(电子束、激光束)焊接/连接/加工技术(见表 1, V)。电子束焊接技术在 625 所的研发,始于 20 世纪 60 年代初期,激光束加工/焊接技术也从 70 年代开始工程应用。80 年代中期,我们敏锐地觉察到,正在国际前沿快速发展的高能束(电子束、激光束)焊接/连接/加工技术对我国国防科技工业制造水平提升的重要性,于 1990 年提交了论证报告,建议组建“高能束焊接/连接/加工”国家级重点实验室,1993 年经国防科工委批准,以 625 所为依托正式建立了“高能束加工技术”国防科技重点实验室。在这个重点实验室,多学科交融引导着专业方向的扩展,无论是电子束还是激光束,作为高品质的高能量密度束流热源的功能在

航空制造领域得到极致的发挥,形成了诸多新兴电子束、激光束焊接/连接/加工制造技术专业化集群,如:焊接、切割、钎焊、制孔、毛化、雕刻、物理气相沉积(EB-PVD)、表面改性、激光冲击强化、增量制造(RPM,金属直接成形制造)等。

• 真空电子束焊接(见表 1, V-1)。其突出优势在于采用大功率束流对大厚度(100~150mm)构件实现不开坡口的深穿透对接焊,这是任何其他焊接热源所无可比拟的。图 3 为深穿

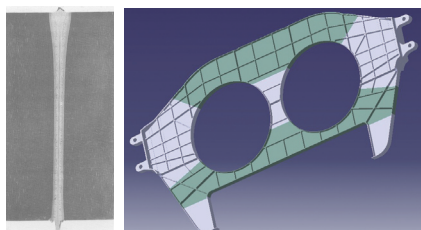


图3 电子束深穿透焊接与飞机钛合金电子束焊接承力结构

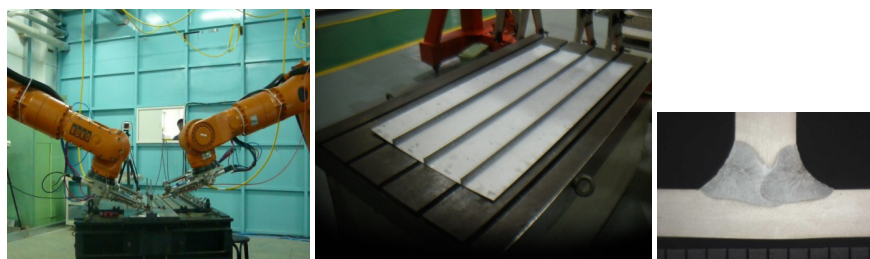


图4 万瓦级激光器的双光束焊接铝锂合金、钛合金飞机带筋壁板与筋条角焊缝

透的对接焊缝的横截面及飞机钛合金大型承力结构,由几块大厚度锻坯用电子束焊接而成,解决了新型飞行器研发的燃眉之急;更为复杂的承力空间桁架梁结构用电子束焊接制造优势明显。

从新技术的研发到技术成熟度的提升,在航空制造中,为达到工程化应用目标,我们为航空制造厂家提供多类别的“交钥匙工程”整体解决方案服务。如研制成功飞机起落架、大型承力构件专用电子束焊机,以及当前国内最大的高压电子束焊机,真空室容积为 85m³。为新一代飞行器研制提供了强有力的技术支撑。

• 激光束焊接/加工(见表 1, V-2)。它是当今高能束流中的一枝独秀,与真空电子束相比,其优势在于可在大气环境采用惰性气体保护完成焊接/加工。随着诸多新型激光器的面世,在“高能束加工技术”国防科技重点实验室先后研发出制孔、毛化、冲击强化、增量制造等加工技术,并推动着在航空工业中的工程化应用。而大功率的光纤激光束用于飞机铝合金结构、铝锂合金、钛合金带筋壁板的焊接制造,为整体化、轻量化飞行器大型承力构件的设计/制造别开生面。图 4 所示为万瓦级激光器的双光束焊接飞机带筋壁板的研发平台。

• 高能束流(电子束、激光束)。它是最具柔性的热源,正是在过去 20 年间增量制造技术得以迅猛发展的技术基础;可聚焦、扫描、偏转的长焦距高能束流与 CAD/CAM 技术相结合,在真空室内或惰性气体保

护的环境中,向加热区填送金属丝材或铺送金属粉料,材料逐层熔化、凝固堆积,构成了无模具的快速成形或称金属直接成形增量制造技术(Additive Manufacturing, Metal Direct Forming, Free Form Manufacturing)。就其原理而言,增量制造最原始的形态就是堆焊,例如用焊条手工电弧堆焊,或用自动化的小电流钨极氩弧、微束等离子弧的填丝堆焊,只是这类焊接热源不具有如上所述高能束流特有的柔性和技术优势;但任何自动化的可控焊接热源与CAD技术相结合均能形成新的增量制造方法。

在新型飞行器研制过程中,结构设计方案总是在不断修改完善,增量制造技术的优势在于能顺应这种变化,并做出快速反应,以

无需模具而实现新结构方案的低成本短周期快速制造。在“高能束加工技术”重点实验室,在真空室内完成了电子束送丝增量制造(Electron Beam Wire Deposition-EBWD)钛合金结构件和用激光同轴喷粉在充氩室内完成了增量制造(Laser Powder Deposition-LPD)钛合金结构件。实践表明,与激光喷粉技术相比,电子束送丝增量制造的优点是可以提高金属材料的沉积速率达5~10kg/h。

(2) 固态连接技术(见表1, VI)。其专业建设在航空特种焊接/连接技术体系中具有特殊的重要意义,多年来所取得的具有标志性的技术进步和成就包括扩散焊、过渡液相连接、超塑性成形/扩散连接、线性摩擦焊、搅拌摩擦焊等新技术在内的创新发展与工程化应用。

• 超塑性成形/扩散连接技术(SPF/DB—Super Plastic Forming/Diffusion Bonding, 见表1, VI-2)。

1980年,我们不失时机地把握国际前沿动态,把特种焊接研究室内的扩散焊方向及时调整为主攻钛合金壁板结构的SPF/DB技术。1986年建立了SPF/DB专业方向随后又成立了专业研究室;从此开启了飞行器钛合金壁板结构设计/制造创新发展之路。不但对飞机、发动机、弹翼、弹体等新型壁板结构实现了工程化制造,取得突出的技术经济效益,而且SPF/DB技术的应用面迅速扩大到各航空和航天设计/制造部门。近年来,在SPF/DB发展中,具有标志性的亮点如图5所示,采用SPF/DB制造的

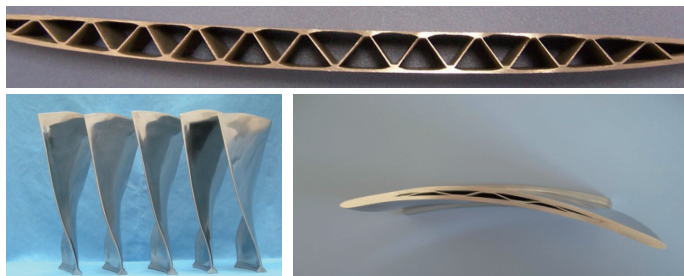


图5 625所采用SPF/DB技术制造的钛合金3层夹芯壁板和宽弦空心叶片及其横截面

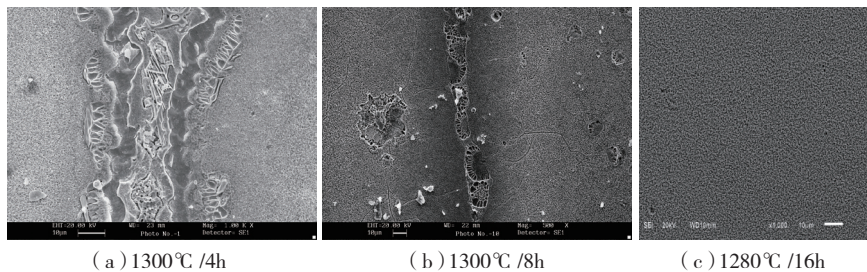


图6 过渡液相连接镍基单晶合金

3层夹芯壁板结构及钛合金宽弦空心叶片,引领了新型飞行器和高性能发动机研制并提供了技术保障。

• 过渡液相连接技术(TLP—Transient Liquid Phase, 见表1, III和VI-1)。它是高温钎焊与扩散焊二者相融合的产物与创新发展。在连接过程中,中间箔层的瞬态液相很快与待连接表面产生冶金反应并扩散,界面消失,形成固态扩散连接接头(故又称钎焊扩散连接)。在625所特种焊接/连接技术体系中,过渡液相连接技术的研发正在解决着航空

制造工程中“特需”和“关键”的难题,尤其在航空发动机设计/材料/制造一体化研发中,已成功地应用于异种金属材料、金属间化合物、定向凝固和单晶叶片、陶瓷、金属基复合材料的连接提供了先进的整体解决方案。

图6所示为过渡液相连接镍基单晶合金过程的演变;图6(a)表示在1300°C经4h保温,中间层熔化填满间隙,部分液相发生等温凝固;图6(b)表示经1300°C/8h完成等温凝固;图6(c)表示随后,经1280°C/16h扩散处理接头组织均匀化;接头的1000°C持久强度达到基体的90%。

为研制高性能航空发动机,在燃烧室多孔层板高温部件的制造中,TLP技术发挥了“关键”的作用,满足了“特需”的苛刻技术要求。图7为采用TLP技术研制的新型发动机燃烧室多孔层板高温部件。

• 线性摩擦焊技术(见表1, VI-3-2)。它是摩擦焊的一个重要分支;继在20世纪80年代末完成惯



图7 TLP用于连接制造新型发动机燃烧室多孔层板高温部件

性摩擦焊发动机压气机转子鼓筒轴研制全套制造技术开发并将工艺指导文件转交承制厂家之后,625 所把摩擦焊的方向确定为下一代高性能发动机叶盘结构设计/制造中的核心关键技术——线性摩擦焊技术及装备的研发。在自主研发的 20t 级和 60t 级的线性摩擦焊设备上正在为新型发动机研发制造不同类型的整体叶盘结构;图 8 所示为采用线性

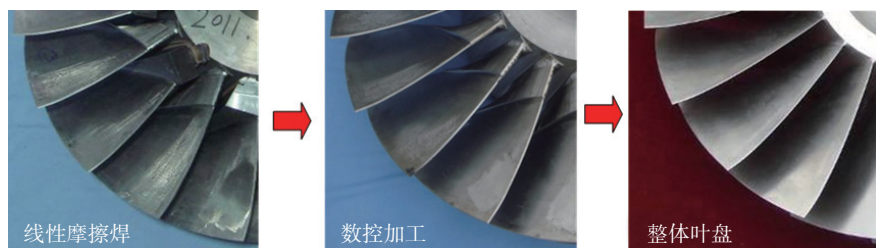


图8 风扇和压气机线性摩擦焊整体叶盘的研制过程

摩擦焊技术制造的风扇和压气机整体叶盘。

• 搅拌摩擦焊接(FSW—Friction Stir Welding,见表 1, VI-3-3)。1992 年英国焊接研究所发明了铝合金板件对接焊缝上用搅拌摩擦工具实现固态连接,很快这项创新性的技术应用与欧美航天、造船铝合金壁板结构制造。这项技术的潜在优势引起我们极大关注,于 1995 年启动了搅拌摩擦焊的研发;2002 年与英国焊接研究所签署了合作建立“中国搅拌摩擦焊中心”双边协议。紧接着,依托 625 所成立了国内首家搅拌摩擦焊专业化公司——北京赛福斯特技术有限公司;并为搅拌摩擦焊接技术专门设立了专业化研究室——第 107 研究室。至此,在航空特种焊接/连接技术体系的大树上新添了一个新的分枝——搅拌摩擦焊接技术(见图 2)。经过 10 多年的努力,搅拌摩擦焊接技术如雨后春笋般地在全国各产业部门得到推广和工程化应用;从航空、航天、舰船、轨道交通、列车车厢、大型宽幅铝合金带筋壁板的制造,到能源、电力、兵器工业

等,作为固态连接技术,搅拌摩擦焊接根除了熔焊方法的缺点,产业化规模日益扩大。图 9 所示为搅拌摩擦焊接制造的大型飞机货舱地板结构,由挤压铝型材在长度方向拼接成宽幅的刚性承力壁板。

除铝合金外,搅拌摩擦焊接技术的研发方向之一就是攻克在熔点高的金属材料上的适用性,从实验室走向工程化应用。

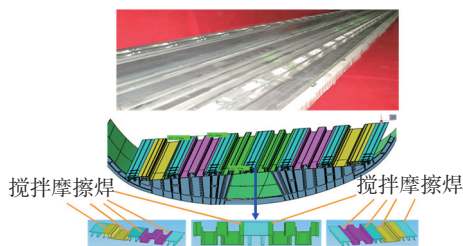


图9 搅拌摩擦焊接将挤压铝型材拼接成大型运输机货舱宽幅刚性地板

回顾与展望

(1) 在 625 所创建 55 周年的历程中,航空特种焊接/连接技术的体系建设已初具规模,从最初的“焊接小组”幼苗,成长为了一颗参天大树。在该技术体系中,涵盖了当今航空工业发展所需要的门类齐全的先先进焊接/连接方法和技术,练就了一支专业科技队伍,各专业技术门类中都有活跃在第一线的科学研究和专业技术服务团队。

(2) 注重国内外学术交流,始终关注国际上焊接学科发展动态并着眼于前沿水平,把握机遇,构建新的专业研究方向;不失时机地组建了“高能束流加工技术”重点实验室、成立了“超塑性成形/扩散连接”研

究室,建立了“中国搅拌摩擦焊接中心”、“航空连接技术”重点实验室等,调整组织机构,培养科研梯队,适应航空特种焊接/连接技术的发展态势,促进专业学科的交融和快速发展。

(3) 航空特种焊接/连接技术服务于航空工业科技发展的需求,及时安排预先研究,承担型号攻关任务,针对“特需”和“关键”的难题,研究新方法、新技术,同时开发与之配套的设备、工装并举,按“交钥匙工程”整体解决方案,用科研成果直接在飞机和发动机研制生产第一线提供技术服务。先后在 10 多种新型飞机和近 10 种新型发动机的研发中做出贡献,获部级、国家级科技进步奖励 80 项,授权专利 60 多项。

(4) 航空特种焊接/连接技术体系的建设与我国焊接产业的发展同步,而诸多专业技术的研发引领了国内同行业的发展;随着军民融合的政策导向,该技术体系的服务目标早已跨越了航空产业的局限,由于焊接/连接方法、技术及其装备的通用性,它的工程应用和技术服务面很宽;经历 55 年的努力,航空特种焊接/连接技术已推广、扩散、辐射、传播到国民经济建设的各个领域,包括航空、航天、舰船、兵器、核工业、装备制造、轨道交通、汽车、能源、电力、化工、电子等。

(5) 面向未来,航空科技迅猛发展的强劲需求牵引,呼唤着特种焊接/连接技术的加快提升与创新;而航空特种焊接/连接技术体系又将如何推动航空制造业的科技进步?无疑,在加速航空工业大发展的前提下,在保持行之有效的已有的运行模式的同时,在市场经济的大环境中,顺应体制机制的改革的大方向,尝试以专业化技术公司的模式,寻求做大、做强发展途径,不失为进一步解放生产力的有效方案,其发展规律也为国内外实践所验证。

(责编 夏宛)