

国产客机机身壁板搅拌摩擦焊 工艺研究

Friction Stir Welding Technology of Domestic Aircraft Pannel

中航工业北京航空制造工程研究所 孟 强 董春林 栾国红
中国商飞上海飞机制造有限公司 杨模聪



孟 强

工学博士,毕业于北京科技大学。现任北京航空制造工程研究所北京赛福斯特技术有限公司项目主管,主要负责飞机薄壁结构的搅拌摩擦焊接新技术、新工艺的开发及相关基础理论研究。

搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)技术以其可靠、绿色、高效的特点,在飞机铝合金壁板结构件连接中具有独特的优势和广阔的应用前景,为国产大型客机的安全使

针对国产客机第三代铝锂合金机身整体壁板,在满足整体结构设计要求的前提下,系统地开展了机身整体壁板 FSW 技术基础工艺试验、接头基础性能评价、缺陷监测、质量评定、焊接变形控制、焊接及铆接典型件力学性能对比、模拟段制造等一系列研究,掌握了相关关键技术,初步验证了 FSW 技术应用于国产客机机身整体壁板结构制造的可行性。

用、高效生产、环境保护提供了崭新的技术选择。铝锂合金具有密度低、比强度高、耐腐等优点,应用于机身壁板制造时,结构件可减重约 10%。目前,第三代铝锂合金(如 AlLiS4 等)很有可能取代现用的 2XXX 系和 7XXX 系列铝合金成为国产客机使用材料。客机机身壁板结构通常是“Z”或“L”形长桁与蒙皮铆钉连接结构形式,但是铆钉连接工序复杂,生产效率很低,受操作工人经验影响较大。此外,大量铆钉还增加结构件重量,降低有效承载面积,导致壁板

结构件承载能力减弱。使用 FSW 代替铆接能够显著降低结构重量、提高结构件整体性能。但是,目前关于第三代铝锂合金的 FSW 报道较少。经过 3 年多的努力、多个科研项目的合作,北京航空制造工程研究所北京赛福斯特技术有限公司、中国商飞上海飞机制造有限公司、上海飞机设计研究院建立了紧密的伙伴关系。各方以提升国产客机制造工艺为目标,验证机身壁板 FSW 制造技术为手段,针对国产客机第三代铝锂合金机身整体壁板,在满足整体结构设计要求

的前提下,系统地开展了机身整体壁板 FSW 技术的基础工艺试验、接头基础性能评价、缺陷监测、质量评定、焊接变形控制、焊接及铆接典型件力学性能对比、模拟段制造等一系列研究,掌握了相关关键技术,初步验证了 FSW 技术应用于国产客机机身整体壁板结构制造的可行性。本文简要介绍了近年来中航工业北京航空制造工程研究所在国产客机机身壁板搅拌摩擦焊工艺方面的研究历程和技术成果。

FSW 基础工艺研究

基础工艺性能研究是焊接技术应用过程的第一步。FSW 基础工艺研究包括焊接工具优化、工艺优化、接头微观组织观察分析、缺陷检测方法及表征技术、缺陷控制技术。在焊接工具优化中,分别针对 AlLiS4 铝锂合金板材对接、AlLiS4 板材与 2099 铝锂合金型材搭接接头设计了 3 种搅拌头,通过对焊接接头力学性能的测试,分别优化出一种形式的搅拌头。测试结果显示:在使用优化出的搅拌头焊接时,所选 9 种对接、搭接参数中,6 种对接接头静强度能够超过母材的 80%。全部搭接接头静强度能够超过母材的 80%,其中 7 种参数超过 85%。试验结果说明 AlLiS4 铝锂合金对 FSW 具有很好的适应性,工艺窗口较宽。再经过参数复验,分别从对接、搭接参数中筛选出 3 组工艺,其静强度均能够稳定超过母材的 80%。微观组织分析显示,力学性能较好的参数接头焊核区发生充分再结晶,热机影响区金属有明显的流动痕迹,且塑性流动层厚度适中。试验现象说明,接头材料流动性能与搅拌头的旋转搬运速度的良好匹配,是形成组织致密、性能良好接头的必要条件。另外,针对对接接头、搭接焊缝的剪切、剥离性能测试结果也证实了这一点。

此外,在 FSW 基础工艺研究中

规划了焊接缺陷的无损检测试验。试验通过调节搅拌摩擦焊接参数及焊接方法,在焊缝内部人为制造隧道型缺陷,利用 X 射线检测、超声波检测以及工业 CT 测试等综合手段,结合对缺陷的金相组织观察,确定缺陷的位置、形状,并建立无损检测信号与实际缺陷的关系。结果显示,超声波难以有效检测出尺度小于 0.3mm 的隧道型缺陷,而工业 CT 和普通 X 射线技术能够有效检测出尺度在 0.15mm 左右的隧道型缺陷。对接 FSW 中,增大对接焊缝间隙至某一临界值时,接头中形成隧道型缺陷,而且随着间隙宽度的增大,隧道直径尺度线性增长。另外,对缺陷边缘的 EDS 成分分析显示,AlLiS4 铝锂合金 FSW 接头隧道型缺陷部位分布着 SiO₂、MgO 以及 Al₂O₃ 等化合物,这些杂质元素的存在主要与焊接热量导致材料氧化以及表面残留物有关。由此可见,焊前清理、降低焊接间隙、优化搅拌头形貌、选择能够使材料流动性能与搅拌头的旋转搬运速度相匹配的焊接参数,是避免 FSW 接头出现孔洞或隧道型缺陷、提高焊接质量最直接的手段。

FSW 接头基础性能评定

FSW 基础性能评定包括接头的静力拉伸、疲劳性能、应力腐蚀、剥离腐蚀及晶间腐蚀性能。在充分掌握 AlLiS4 对接、AlLiS4/2099 搭接接头静力拉伸性能的基础上,针对 2 种结构形式分别初选出 3 种静力性能较优的参数进行疲劳测试,通过不同应力水平下的疲劳寿命测试对比,分别优化出一种

疲劳性能较优的参数进行 S-N 曲线的绘制,并与母材的疲劳性能对比。结果显示,在优选参数下,对接接头达 200 万次疲劳寿命时的最高应力水平为母材 200 万次疲劳寿命最高应力水平的 85%。搭接接头的静力拉伸性能虽然普遍高于对接接头,但是疲劳性能较低,试样均从焊接接头前进侧“Y”形交界点处生成裂纹源,如图 1 所示。分析显示,在疲劳实验过程中,“Y”形交界点容易形成应力集中,萌生裂纹并迅速扩展,导致样品很快发生断裂,因此疲劳寿命显著降低。

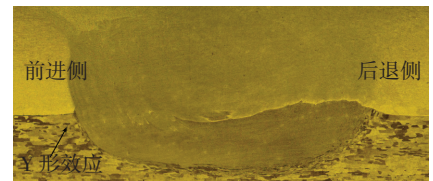


图1 搭接接头金相组织

客机在越洋飞行过程中,机身结构必将受到海洋环境的腐蚀,因此,考察接头的耐蚀性能是 FSW 技术应用于机身结构的必要环节。针对客机搅拌摩擦对接焊缝的耐蚀性研究包括剥层腐蚀、晶间腐蚀、应力腐蚀性能测试。对接接头剥层腐蚀测试结果显示,FSW 接头腐蚀均由点蚀开始,随着时间的延长逐渐演变为剥蚀,所选 3 种工艺接头焊接区域的耐蚀性明显优于母材,如图 2 所示。焊核耐蚀性优于热机影响区及热影响区,但随着浸泡时间的推移,腐蚀

	A 工艺	B 工艺	C 工艺
5h			
48h			
120h			

图2 AlLiS4铝锂合金对接接头剥蚀浸泡后宏观形貌

程度趋于一致。晶间腐蚀测试结果显示,各参数接头均以点蚀为主,未见有晶间腐蚀倾向。应力腐蚀试验采用腐蚀环境下慢速拉伸的方式执行,拉伸速度为 1×10^{-6} ,分别记录焊接试样在腐蚀及惰性环境下的应力-应变曲线,根据所测数据,计算出A、B、C这3种接头的应力腐蚀指数 I_{SSRT} 分别为0.01、0.1、0,断面收缩率分别为106%、83%、127%,其中应力腐蚀指数越小、断面收缩率越大则说明接头应力腐蚀倾向越低。综合两种参数评定可以看出,C工艺接头在所执行的试验条件下,无应力腐蚀倾向。由剥层腐蚀、晶间腐蚀、应力腐蚀的试验结果可以看出,A1LiS4对接FSW接头具有良好的耐腐蚀性能。搭接FSW接头为A1LiS4/2099双层结构,考核区在层间缝隙内部,不适于采用对接焊缝的腐蚀评定标准,相关评定方法有待进一步探索。

焊接、铆接典型性能对比研究

典型件选取2060铝锂合金蒙皮、2099铝锂合金长桁材料的机身壁板等比例带格框的真实结构,采用FSW技术及传统铆接工艺制造,分别进行了壁板级试验件的静力拉伸(焊、铆各3件)、拉伸疲劳(各5件)、剪切(各3件)、压损(各3件)承载能力测试,试验件尺寸分别达到 $300\text{mm} \times 800\text{mm}$ 、 $300\text{mm} \times 800\text{mm}$ 、 $950\text{mm} \times 950\text{mm}$ 、 $1000\text{mm} \times 600\text{mm}$,每件试验件所使用的应变片数量分别达到12片、12片、60片、60片,焊接、铆接测试试验件的结构尺寸、试验条件、贴片位置、加载过程均相同,试验过程详细记录了加载过程中试验件各考核点的受力及变形情况。图3展示了加载中的试验件。

静力拉伸试验结果显示,FSW试验件在焊缝前进侧附近断裂,铆接件在钉孔处断裂,焊接件平均承

载能力比铆接件高出23MPa;拉伸疲劳实验结果显示,焊接件大部分断裂于母材,铆接件均在钉孔处断裂,同等应力水平下焊接件拉伸疲劳平均寿命比铆接件高出约35000次;剪切实验结果显示,焊接件最大剪切力比铆接件高出约40kN,铆接件的破坏形式表现为蒙皮皱曲、铆钉拉断、长桁与蒙皮在波谷处分离、长桁扭转弯曲等,焊接件的破坏形式表现为蒙皮皱曲、格框铆钉拉断/拉脱、长桁弯曲变形。由此可见,此类结构件的强度薄弱点主要为铆钉本身。压损试验结果显示,焊接及铆接件均表现出整体屈曲的特点,结构件的受力薄弱点位于长桁腹板根部及部分铆钉位置,两种类

型试验件的承载能力相差不大,约为360kN。综合上述试验结果可以看出,相比传统铆接工艺,采用FSW技术的典型件壁板,从静力拉伸、疲劳、剪切性能方面体现出明显的稳定优势。此外,在后续工作中,项目组还将通过数值模拟、局部解剖分析等手段进一步探究该类型结构件的受力及破坏规律,从而获得体系性的研究成果。

大尺寸壁板模拟件的FSW制造

制造模拟之前首先通过典型件的焊接考察大尺寸FSW件的变形控制方法。典型件宏观尺寸为 $600\text{mm} \times 600\text{mm}$,表面均布3条长

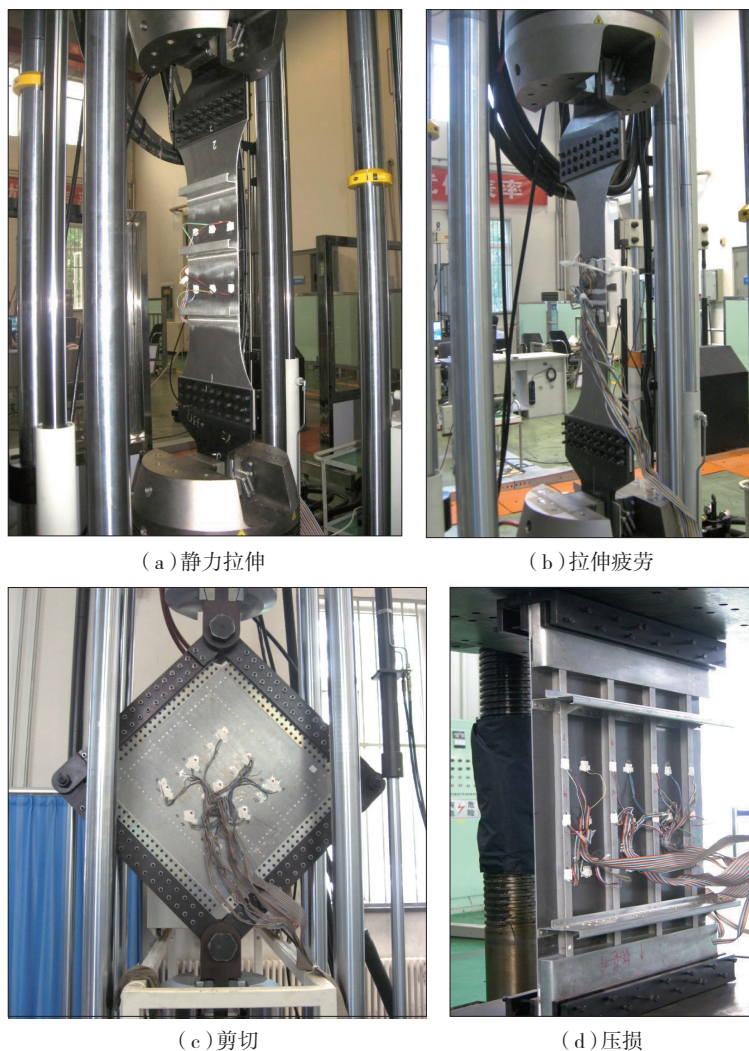


图3 壁板级试验件力学性能测试过程

桁。试验分别考察了焊缝热沉冷却法、焊后焊缝滚压法、喷丸等方法对焊接变形的控制效果,并与常规焊接状态进行比较。焊接件变形量评定方法为:将焊接后典型件长桁向上平置于检测平台,测量壁板边缘10个固定位置考察点与平台面之间的间隙,计算得出平均值,值越高则说明焊件变形量大,反之亦然。试验结果显示,自由焊接状态下,焊接件变形量最大,变形量均值达到2.33mm,采用热沉冷却后,变形量均值降至1.78mm,由此可见,虽然焊接过程施加冷却能够在一定程度上降低典型件的宏观变形,但是控制效果有限,仍然不能满足实际装机要求。采用滚压法对常规焊接件进行矫形,测得处理后焊件的变形量均值为1.09mm,变形控制效果好于热沉法,但是并未消除变形,典型件的尺寸精度仍然不高,不能满足装机要求。实施喷丸矫形后,将典型件壁板放置于检测平台之上,板面与平台贴合紧密,实测平均变形量均值仅为0.15mm,可见喷丸对AlLiS4+2099壁板的矫形效果明显好于焊缝热沉冷却法、焊后焊缝滚压法,矫形后的典型件能够达到使用要求。

制造模拟件是验证搅拌摩擦焊技术应用可行性的重要手段。在国产客机机身壁板搅拌摩擦焊技术研究中,大尺寸壁板模拟件定义为单曲率蒙皮/长桁结构,目标尺寸超过2000mm×1000mm,表面均布8条长桁。模拟件的焊接制造分为焊接和成形两段工序,通过搅拌摩擦焊技术实现蒙皮与长桁的连接,焊后试验件为平板结构,然后使用喷丸成形技术实现平面带筋壁板的单曲率成形。制造过程中为了降低焊接变形对后续喷丸成形工艺的影响,焊接时采用特殊的变形控制技术,使板面各条焊缝的残余应力及焊接变形均匀分布于整个焊接件,从而有效地降低了模拟件焊接的宏观变形,焊后模拟件实

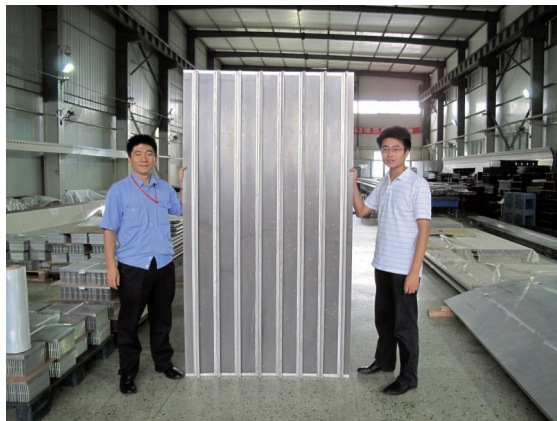


图4 焊接模拟件

物如图4所示。从图中可以看出,模拟件长桁平直、分布均匀、蒙皮平整,放置于检测平台,试验件边缘与平台间隙较小,测量值在10mm左右,说明焊接变形控制工艺起到了良好的效果。

焊接模拟件的喷丸成形加工使用专用模具,利用超音速喷丸设备进行喷丸成形。将喷丸成形后的模拟件放置于检测模具内,对模拟件典型位置点进行贴模间隙测量,根据测量结果对贴模间隙超标位置进行修型。图5给出了自由状态下喷丸成形模拟件实物照片。从图中可以看出,模拟件长桁平直、蒙皮曲率均匀,与检测模具贴合紧密,即使在自由状态下也具有良好的贴模状态。测量结果显示,模拟件各部位贴模间隙均小于0.8mm,能够满足实际使用要求。由此可见,采用FSW焊接结合喷丸成形的方案,能够制造出符合实际使用要求的大尺寸搅拌摩擦焊接带筋壁

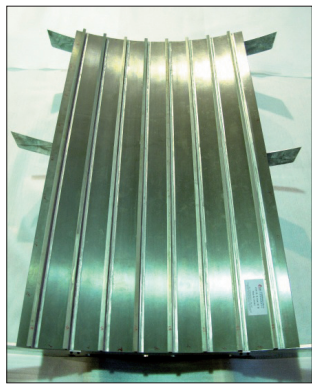


图5 模拟件壁板

板。此外,对于FSW焊接件也可采用时效蠕变的方式进行矫形或成形,但需要制造夹具、摸索工艺等大量研究和准备,相关研究将在后续工作中深入开展。

结束语

通过对铝锂合金的FSW试片级试验件静力性能、疲劳测试、微观组织

及织构分析、焊缝性能评定、壁板级试验件的力学性能测试、大尺寸模拟件焊接等一系列试验验证,项目组已经掌握了AlLiS4铝锂合金的搅拌摩擦焊核心技术,初步形成了搅拌摩擦焊机身整体壁板的测试设计、制造及测试技术体系。但是,现有研究对于实际应用而言还不够全面,尤其是在焊接结构完整性、FSW接头成形机理、结构件受力及破坏分析等方面还有待于开展更加深入、系统的研究工作。

飞机结构采用搅拌摩擦焊连接可以以小拼大、以焊代铆、节材减重、降低成本,同时能够很好地解决气密、腐蚀等问题。作为一项先进的焊接技术,FSW的优势还体现在连接过程的快速、高效,经过焊接参数优化,对机身结构件的焊接速度可达到300~500mm/min。同时,通过对焊接设备和工装卡具的进一步专业化优化设计,实际焊接生产效率将比铆接高出数倍甚至数十倍。

可以看出,对于飞机壁板结构件的制造而言,搅拌摩擦焊技术从接头性能可靠性、焊接工艺的高效率以及先进性等各方面,都体现出传统铆接技术不可比拟的优势。将搅拌摩擦焊技术应用于国产客机的生产制造中,无疑将实现结构性能、生产效率、工业效益的完美结合,显著提升产品的品质和竞争力,也必将惠及其他各类型号飞行器。(责编 亦非)