

飞机制造中的搅拌摩擦焊技术及其发展

Fricition Stir Welding Technology and Its Development in Manufacturing of Aircraft

北京航空制造工程研究所 栾国红
中国搅拌摩擦焊中心



栾国红

1992年毕业于西北工业大学材料科学与工程系。2001-2002年,作为访问学者出访加拿大多伦多大学,长期从事压力焊、熔焊、搅拌摩擦焊等焊接方法的工艺及设备研究和开发,参加并负责多项国防预研课题、国防基础课题及总装课题。现为北京航空制造工程研究所高级工程师,搅拌摩擦焊接技术专家。

21世纪国内外多种新型飞机的研制,如国内的新一代战机、舰载机、大型运输机和大型客机等,国外的第5代战斗机、远程轰炸机、新型客机和无人机等,促进了飞机制造技术的飞速发展。其中,搅拌摩擦焊技术就是先进飞机制造技术中的一个新亮点,并且已经在多种新型号飞机制造中得

新型高性能飞机的研制在制造技术方面促进了搅拌摩擦焊技术在飞机制造中的应用和发展,适合于飞机不同材料和结构的特点使搅拌摩擦焊演绎出了多种不同的新型搅拌摩擦焊技术,如搅拌摩擦点焊技术、双轴肩搅拌摩擦焊技术和函数曲线搅拌摩擦焊技术等,这些技术已经在多种飞机结构中得到工程化应用。搅拌摩擦焊技术的日渐成熟和发展将逐渐汇入新型飞机制造的主旋律中。

到应用。

在众多先进飞机制造技术中,针对飞机金属材料(铝合金、钛合金)的连接,搅拌摩擦焊具有焊接材料兼容性好、接头性能高等特点;针对飞机薄壁复杂金属结构,可以利用平直缝焊、点焊、胶接复合焊、函数曲线焊和空间轨迹焊等众多搅拌摩擦焊方法,实现新型飞机的整体化制造和装配,甚至可以在役飞机结构零件的修理和恢复。迄今为止,利用搅拌摩擦焊技术已经实现了飞机机翼、机身、翼盒、地板、密封舱以及加强筋板等零部件的制造,对于提高飞机性能和生产效率以及降低生产成本有着显著作用。

本文将对适合飞机结构制造的搅拌摩擦焊技术进行较详细的论述和介绍,并且对其工程化应用和发展进行阐述。

搅拌摩擦焊技术特点和优势

搅拌摩擦焊是一种机械加工的固相焊接新方法。搅拌摩擦焊过程中,搅拌头旋转着插入被焊接工件的界面处,由于搅拌头的轴肩和搅拌针与被焊接工件材料密切接触并持续摩擦,产生的摩擦热使搅拌头附近的被焊接金属材料温度升高并热塑化,当搅拌头沿着焊接界面向前旋转移动时,热塑化金属被搅拌头向后转移同时被实施动态顶锻压力作用,在热-力联合作用下实现材料冶金扩散连接,在搅拌头的后方形成致密的焊接接头。

搅拌摩擦焊热源主要是机械摩擦热和塑化材料变形功。焊接过程是一个温度自适应动态平衡过程,焊接温度始终低于被焊材料熔点,虽然有报道发现焊接过程会产生低熔点

合金的瞬时熔化,但整体而言搅拌摩擦焊接仍是一个固态焊接过程。同时由于焊接温度低,搅拌摩擦焊对材料和结构的适应性好、接头性能高、变形小,它还具有节能、环保和宜人化等特点。

表1为典型铝合金材料搅拌摩擦焊接接头和母材机械性能测试对比。从表中可以看出,搅拌摩擦焊接接头性能优异,有时接头性能接近或超过母材,如5A06铝合金和7A52铝合金

的搅拌摩擦焊接头在进行拉伸强度测试时,断裂位置均发生在母材上,表示采用FSW技术焊接5A06和7A52铝合金可以达到与母材等强度的目标;在塑性指标(延伸率)方面,5A06铝合金FSW接头的延伸率几乎与母材相同。当然表中所示2A14、2219和6063材料属于热处理时效沉淀强化铝合金,焊接过程由于受到热循环的作用导致强化相脱溶,接头强度指标低于母材,但是研究表明通过后期

热处理,接头强度可以恢复到与母材等强度的状态。

针对飞机结构,利用搅拌摩擦焊实现飞机制造具有明显的技术和经济优势。

首先,搅拌摩擦焊可以为飞机设计提供新的方法和思路。例如飞机设计师可以优先考虑商业化的高强铝合金材料代替昂贵的复合材料,并且利用搅拌摩擦焊实现不同种类铝合金甚至铝锂合金的焊接,从而降低材料费用和成本。

其次,利用缝焊、点焊和胶接复合焊等不同种类的搅拌摩擦焊技术可以实现飞机壁板类结构的“无铆”和“无损”制造,维持飞机材料性能的一致性和结构的整体性,同时还具有密封和减重的效果。

第三,飞机中大量使用了带筋壁板结构。传统的制造方法是铆接和胶接,现在可以利用搅拌摩擦焊焊接批量化的铝合金挤压型材实现飞机带筋壁板结构的高效、低成本制造。

第四,利用大型精密数控搅拌摩擦焊设备可以实现飞机结构零件的标准化和数字化制造。利用搅拌摩擦点焊机器人等可以实现飞机零部件的“流水线”制造和装配,提高飞机制造的自动化水平。










飞机制造中的搅拌摩擦焊技术

搅拌摩擦焊非常适合平直长焊缝的连接,具有性能稳定效率高的特点,但是为了适应不同材料和结构的需要,经过十多年的研究开发,已经发展出具有不同特点的多种搅拌摩擦焊技术,如搅拌摩擦焊环缝焊接技术、点焊技术和空间曲线技术等。针对飞机结构和特点,下面将对适合飞机制造的搅拌摩擦焊技术分别进行介绍。

1 平直对接搅拌摩擦焊技术

普通搅拌摩擦焊一般是指能够实现平直对接焊缝的搅拌摩擦焊,这种纵缝焊接技术简单实用、搅拌工具

表1 典型铝合金材料搅拌摩擦焊接头强度和断裂位置对比

材料种类和类别	断裂位置	强度 σ_b /MPa	塑性 δ /%	接头系数	FSW 断裂接头	
2A14-T6	BM	-	475.07	13.83	-	
	FSW	HAZ	397.59	4.25	83.7%	
2219-T4	BM	-	448.55	6.8	-	
	FSW	接头	355.25	5.52	79.2%	
5A06-O	BM	-	361.70	24.62	-	
	FSW	母材	394.91	24	100%	
6063-T651	BM	-	304	16.61	-	
	FSW	接头	252	6.96	82.9%	
7A52-T4	BM	-	505	9.0	-	
	FSW	母材	511	6.5	100%	
2024-T3	BM	-	501.4	24.2	-	
	FSW	接头	475.7	8.8	95%	
2524-T3	BM	-	449.2	28.9	-	
	FSW	母材	449.8	13.0	100%	
7050-T7451	BM	-	526.5	13.1	-	
	FSW	接头	462.5	9.8	87%	
7075-T6	BM	-	566.3	14.5	-	
	FSW	接头	475.8	6.4	84%	

注: BM表示母材, FSW表示搅拌摩擦焊。

(搅拌头)简单、控制参数少,对设备的功能要求低。宽幅型材壁板搅拌摩擦焊制造,只要焊接垫板的平面度在0.2mm以内,对接间隙少于板厚度的1/10,且工件的厚度差在0.5mm以内,只需要简单平直夹具就可以实现焊接,一般适合于平板和型材的平直对接结构焊接,如在飞机制造中,飞机机身蒙皮平直结构的纵缝对接、大型飞机型材地板结构等。图1所示为平直对接搅拌摩擦焊制造的飞机带筋壁板结构产品。

平直对接纵缝搅拌摩擦焊设备种类很多,有针对研究教学用的小型台式搅拌摩擦焊设备,有针对薄壁筒体结构的悬臂式搅拌摩擦焊设备,有针对航天燃料贮箱的垂直立式搅拌摩擦焊设备,以及针对高速列车车身壁板的大型龙门式搅拌摩擦焊设备。图2所示为目前国内能够满足大型飞机地板结构产品制造的宽幅型材壁板搅拌摩擦焊设备。该设备能够适应多种截面结构型材产品的搅拌摩擦焊制造,焊接厚度可以达到15mm,有效焊接长度达到18000mm,能够实现尺寸为18m×6m的宽幅型材壁板的搅拌摩擦焊。

2 平面曲线对接搅拌摩擦焊技术

对于飞机口盖类结构产品和中空散热器结构产品一般需要平面曲线

搅拌摩擦焊技术进行焊接。该技术的关键是能够在工件厚度范围内保持搅拌工具尖部沿着曲线焊缝聚焦,并且在焊接过程中能够使搅拌工具实现0~5°焊接倾角范围内沿着焊接曲线轨迹进行切线调

整。平面曲线搅拌摩擦焊接头设计多为对搭接结构,工件缝隙要求紧密,高度差不超过0.5mm,焊接过程倾角的调整和跟随连续而稳定,否则容易产生隧道型和局部富聚型空洞缺陷。目前中国搅拌摩擦焊中心已经利用平面曲线搅拌摩擦焊技术实现了多个飞机口盖类产品以及电子和雷达系统的中空散热器产品的搅拌摩擦焊制造,如图3所示。

平面曲线搅拌摩擦焊设备相对比较复杂。普通数控铣床只要有2个坐标轴联动就可以实现平面加工,但搅拌摩擦焊必须有3个坐标轴在同一个平面内插补联动才能实现平面曲线轨迹的跟踪,同时还要加上主轴的旋转和高度方向的调节才能实现焊接。图4所示就是中国搅拌摩擦



图1 平直对接搅拌摩擦焊制造飞机带筋壁板

焊中心开发的五轴三联动台式平面曲线搅拌摩擦焊设备以及所焊接的平面曲线产品。

3 搭接函数搅拌摩擦焊技术

在大型飞机机身制造中,“工”形、“Z”形和“L”形加强筋条和蒙皮壁板之间的搭接结构非常普遍,通常用铆钉连接,制造过程需要制孔、扩孔、涂胶和铆接等多道工序,而且每个铆接点都是一个独立的操作过程,铆接点的一致性较差。在压弯试验中,飞机蒙皮和筋条铆接结构件以铆接点的整体破坏形式失效,很容易引起飞机结构的连锁破坏反应,后果是非常严重的。

在新型大飞机的机身蒙皮结构制造中已经开始用搅拌摩擦焊搭接纵缝代替铆接,如图5所示。这种“以焊代铆”的制造方法具有减重和提高结构整体性的优势。虽然这种结构与传统的飞机铆接制造工艺相比具有优势,但是由于搭接焊缝两边具有“楔形”缺口,是潜在的裂纹源,有可能会影响飞机结构零件的疲劳性能和使用寿命。基于搭接直缝的搅拌摩擦焊具有明显的工艺不完善性,尤其是焊缝两边“楔形”缺口方向的一致性,有可能造成结构件的单向失效或性能降低。所以对于飞机薄壁搭接结构,中国搅拌摩擦焊中心开发了函数曲线搭接搅拌摩擦焊技术。

函数曲线搭接搅拌摩擦焊技术就是利用平面曲线搅拌摩擦焊设备



图2 宽幅型材壁板拼接搅拌摩擦焊设备



图3 中空散热器结构平面曲线搅拌摩擦焊制造

沿着搭接工件方向做几何函数轨迹搅拌摩擦焊运动的,如正弦函数曲线或余弦函数曲线。试验证明,函数曲线轨迹搅拌摩擦焊连接强度比平直焊缝强度增加 25% 以上。在中国,中国搅拌摩擦焊中心正致力于该技术在飞机薄壁带筋结构中的应用研究。在国外,美国 NASA 已经把该技术应用于新一代“宇宙神”火箭的 $\Phi 5.5\text{m}$ 燃料贮箱的搅拌摩擦焊制造(图 6); 欧洲的空客公司已经开始在系列大型客机壁板结构件制造中使用函数曲线搅拌摩擦焊技术。

4 飞机装配搅拌摩擦点焊技术

对于飞机壁板结构的搅拌摩擦焊,一项新型的“搅拌摩擦焊点焊”(Friction Stir Spot Welding, FSSW) 技术正在兴起,这是一种适合于飞机复杂结构制造和装配的新技术,将会对未来飞机铝合金结构制造和装配体系产生巨大影响。

在传统焊接知识中,点焊主要指电阻压力点焊,其原理是利用大电流经过焊接界面形成的电阻热能使焊接界面局部熔化,在压力的作用下冷却凝固形成焊点接头。而搅拌摩擦点焊是利用搅拌头插入工件后在局部进行停留旋转摩擦一定时间后,不作横向移动,然后退出,在工件上形成点状搅拌摩擦焊接头。其原理是利用摩擦产热和搅拌头高速旋转所形成的塑性金属流动而形成焊点。搅拌摩擦点焊过程有旋转、插入、停留搅拌、退出等 4 个典型的阶段组成,焊接循环一般为 1~5s,停留时间一般为 1~3s,它是一种高效的搅拌摩

擦焊方法。搅拌摩擦点焊与电阻压力点焊相比明显克服了电阻压力点焊缺点,搅拌摩擦点焊较电阻点焊电能消耗下降 99%,并且不需要冷却剂、压缩空气以及电阻点焊必须的大浪涌电流,设备投资可下降 40% 以上,不需要进行焊前预处理,不会产生烟尘和飞溅。搅拌摩擦点焊是新型的绿色点焊技术。

搅拌摩擦点焊自 2000 年问世以来,已经在汽车工业领域获得了工程化的应用,如日本马自达汽车公司已将搅拌摩擦点焊用在 Mazda RX-8 型跑车的铝合金车体和车门的焊接上,日本的川崎重工已经在汽车钢结构工件中规模化使用搅拌摩擦点焊技术。经过生产时间证明搅拌摩擦点焊是一种既适合铝合金又适合钢

点焊。其中对 F22 现役飞机的改进改型中采用搅拌摩擦点焊可以在机翼结构中减重 17.5%,并且还可以提高生产效率和降低制造成本。尤其是在飞机带筋壁板的搭接结构中,搅拌摩擦点焊不穿透搭接结构的下板,不损伤飞机外表面的包铝层,可以提高飞机的整体性和防腐蚀能力。在性能方面美国空军研究中心认为搅拌摩擦点焊的特点决定了该技术在搭接结构连接上优势明显。该中心研究了飞机带筋壁板搅拌摩擦点焊、搅拌摩擦焊和铆接结构的性能对比,结构形式为 2024-T3 和 7075-T6 搭接结构。试验证明,搅拌摩擦焊和搅拌摩擦点焊剪切性能均优于传统飞机铆接结构,并且抗损伤能力大幅度提高。在相同的外载下,搅拌摩擦点焊肋板与



图4 台式平面曲线搅拌摩擦焊设备及产品

合金等高熔点材料点状连接的新技术,搅拌摩擦点焊工具的寿命可以达到 100 万次以上,可以大幅度地提高生产效率、节约能源。

美国先进材料加工中心(AAMP)和波音公司也已经开始尝试在飞机等先进武器装备中使用搅拌摩擦焊

搅拌摩擦搭接焊肋板焊接接头产生的位移相同,并且搅拌摩擦点焊结构最大承载能力优于搅拌摩擦搭接焊结构。

5 大厚度飞机铝合金结构搅拌摩擦焊技术

在大型飞机机翼、翼盒以及密封

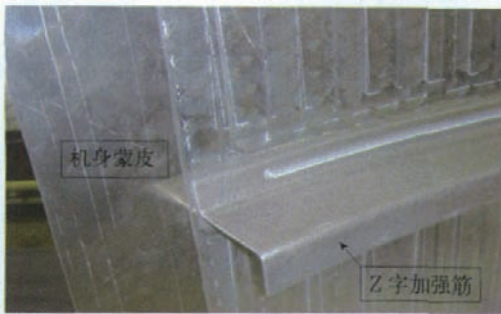


图5 机身蒙皮结构的搅拌摩擦焊制造



图6 铝合金薄壁结构正弦函数曲线搅拌摩擦焊接

端框等结构中经常会使用宽幅大厚度铝合金壁板和结构,其中这些飞机结构的原始坯料很多是预拉伸板。目前,在世界范围内满足设计规格尺寸的预拉伸铝板的制造是一个比较大的难题,要实现飞机的整体结构制造,需要对大厚度铝合金结构进行连接和焊接。针对飞机机翼等结构,大厚度铝合金板材种类主要为2000 (Al-Cu) 和7000 (Al-Zn-Cu) 系列铝合金,采用常规熔焊方法(TIG/MIG)焊接大厚度铝合金,存在缺陷多、性能低、效率低和变形大等诸多技术难点,不能用熔焊方法焊接。搅拌摩擦焊是目前飞机大厚度铝合金结构最先进的焊接方法。

飞机机翼带筋壁板的传统机械加工方法是按翼板筋条高度选择等厚的铝合金板材,然后采用机械加工方法将多余材料加工去除。显然,这将造成大量的材料浪费,且需要很长的加工周期,从而使材料成本和制造成本大大提高。相对于传统制造方法,采用搅拌摩擦焊技术具有明显的优势。在空客公司A340E型飞机的机翼框架中,有一种中间薄两边厚的“工”字结构,在薄板和厚板的连接处

接头厚度将达到40mm,传统方法采用高精度机械加工,但存在加工成本及效率等问题,空客公司采用搅拌摩擦焊实现了40mm厚铝合金的焊接。如图7所示,现已完成结构件的焊接及部件级强度性能试验。

在中国,中航工业北京航空制造工程研究所中国搅拌摩擦焊中心在2004年成功研制了国内首台焊接厚度25mm铝合金结构的搅拌摩擦焊装备,并进行了25mm厚度铝合金构件的搅拌摩擦焊技术开发。此后在2007年又研制成功亚洲第一台重型搅拌摩擦焊装备,开发了重型搅拌摩擦焊主轴系统,研制了系列化的搅拌摩擦焊工具

(图8),实现了70mm厚度高强铝合金结构件的焊接。目前该技术已经在中国大型军用运输机、下一代高性能战斗机中得到应用。

搅拌摩擦焊在飞机制造中的应用

基于搅拌摩擦焊在飞机制造和装配中的诸多优点,世界范围内的飞机制造公司如空客、波音、月蚀和德宇航等,一方面在开发适合飞机结构和材料的新型搅拌摩擦焊工艺方法,另一方面针对飞机特殊零部件开展搅拌摩擦焊应用研究和装机飞行试验,以确定搅拌摩擦焊连接技术在飞机制造中的实用性、可靠性和安全性等。

首先,大型民用客机和大型军用运输机的主体舱段就是飞机机身。飞机机身尤其是中机身主要由平直带筋壁板和小曲率弧形壁板组成,这些结构可以用搅拌摩擦焊实现加强筋和机身蒙皮的连接以及蒙皮和蒙皮的对接。这样的飞机搅拌摩擦焊结构已经在空客A350-800和900型飞机中得到应用,甚至正在尝试在新型A380飞机中同时应用搅拌摩擦焊和

激光焊实现机身带筋壁板制造。另外,飞机机身蒙皮的环向对接和框段之间的装配制造也可以应用搅拌摩擦焊。目前机身的环向连接主要是精密铆接结构,根据连接部位载荷的大小,每个接头需要4~8排铆钉及高锁连接,接头包括加强板、束缚条、结合板和界面框架。现在主要研究和应用目标是用框架间搅拌摩擦焊连接代替铆钉连接。对于环向蒙皮的对接,可以用空间曲线搅拌摩擦焊实现,也可以用搅拌摩擦点焊实现框架间的装配,在中国已经具有类似的技术基础,2006年中国搅拌摩擦焊中心已经帮助航天客户实现运载火箭燃料贮箱的空间曲线纵缝以及环缝的焊接,为飞机机身的环向连接奠定了技术基础。

其次,大飞机机翼结构制造也可以应用搅拌摩擦焊。先进宽幅翼面壁板结构制造工艺为数控机械加工和喷丸成型,这样的大型工件整体制造成本很高,目前波音和空客公司正在尝试用搅拌摩擦焊实现小型壁板的连接,以期降低生产成本和提高制造效率。对于机翼内部数量众多的承力墙结构也用搅拌摩擦焊实现边框和腹板的连接,从而降低数控加工的时间和提高原材料的使用效率。在新型战斗机的机翼制造中考虑到机翼油箱的强度和密封要求,现在正在采用搅拌摩擦焊实现厚度70mm高强铝合金的连接,以期达到机翼油箱结构整体制造的目的,但是对结构的疲劳性能提出了严格的要求,目前测试工作正在进行中。

第三,飞机的舱门和口盖的搅拌摩擦焊制造。飞机机体和机翼上含有多个舱门、检修和维护窗口以及操作口盖,所有机身开口的部位都需要预成型件来增强开口部位的强度和刚性,这些舱门和口盖外形一般有气动要求,内部往往有复杂的刚性支撑,利用搅拌摩擦焊与超塑成型复合工艺可以实现此类零件的无铆接头的制

造。如飞机舱门、窗口、检修和维护口盖等都可以使用搭接搅拌摩擦焊和搅拌摩擦点焊制造,也可以使用5坐标复杂搅拌摩擦焊设备实现空间复杂结构的搅拌摩擦焊整体制造。

第四,飞机货舱地板、仪器舱壁板和斜台等型材搅拌摩擦焊制造。大型运输机和客机中的货舱地板、战斗机的驾驶舱以及仪器舱壁板等现在的制造工艺一般是铝合金型材结构加搅拌摩擦焊接,这种工艺技术有

继续采用低成本的铝合金材料,此类结构的连接工艺已经逐渐采用搅拌摩擦焊,如尾翼方向舵、腹翼以及襟翼等都可以利用搅拌摩擦焊实现封闭式结构的整体制造。

搅拌摩擦焊在飞机制造中的发展

宇航制造领域的应用需求一直是搅拌摩擦焊技术发展的促进剂。在飞机制造领域搅拌摩擦焊技术的

发展首先是针对高强铝合金材料进行焊接性研究,然后针对飞机平直对接结构、带筋壁板搭接结构和空间曲线结构等进行了结构适应性研究,另外还针对飞机零件的搅拌摩擦焊工程化应用。在装备技术上一直向着自动化、数字化和柔性化发展。

适合于飞机壁板类结构的搅拌摩擦焊,一般采用龙门式搅拌摩擦焊接装备,但是大型结构如果采用传统的搅拌摩擦焊接技术,需要对产品零件进行刚性固定和支撑,设计制造成本高,难度大。如今,基于普通搅拌摩擦焊方法发展出了双轴肩自支撑搅拌摩擦焊技术和相关装备,这种技

术带有2个相互作用的焊接轴肩,焊接力在轴肩内部相互作用抵消,焊接过程甚至只需要很小的向前驱动力就可以实现焊接,对设备而言,可以节省60%的结构刚性,设计和制造成本大幅度降低。所以针对飞机复杂型面结构产品,可以利用五坐标以上的精密数控机床和机器人等来实现搅拌摩擦焊接。有资料报道,空客公司已经利用重型机器人(承载1000kg)实现了30mm厚度飞机模拟结构的焊接,可以说,搅拌摩擦焊在飞机大型关键结构中的应用透出了黎明的曙光。

随着普通搅拌摩擦焊技术的掌握和成熟,搅拌摩擦焊已经开始衍生出新的技术。如可以应用于飞机短小结构和复杂空间结构零件制造和装配的搅拌摩擦焊点焊技术就已经发展出摆动点焊技术、回转式点焊技术以及回填式点焊技术等。中国搅拌摩擦焊中心最新开发了回转式搅拌摩擦点焊接头,该点焊技术可以使连接强度提高200%以上,并且可以消除搭接搅拌摩擦焊时的界面畸变。初步研究表明普通搅拌摩擦焊点焊接头(回转半径 $r=0\text{mm}$)的剪切强度为1.9kN;当 $r=1\text{mm}$ 时接头的剪切强度为3.68kN;当 $r=2\text{mm}$ 时接头的剪切强度为6.72kN;连接强度分别增加到回转半径为0时的194%和353%。

结束语

新型高性能飞机的研制在制造技术方面促进了搅拌摩擦焊技术在飞机制造中的应用和发展,适合于飞机不同材料和结构的特点使搅拌摩擦焊演绎出了多种不同的新型搅拌摩擦焊技术,如搅拌摩擦点焊技术、双轴肩搅拌摩擦焊技术和函数曲线搅拌摩擦焊技术等,这些技术已经在多种飞机结构中得到工程化应用。搅拌摩擦焊技术的日渐成熟和发展将逐渐汇入新型飞机制造的主旋律中。

(责编 玉龙)



图7 空客A340机翼搅拌摩擦焊结构件

助于节省材料和提高生产效率,并且可以大幅度降低制造成本。在国外,美国波音公司C-17和C-130大型军用运输机的货舱地板、斜台地板和货物滑板等已经开始采用铝合金型材和搅拌摩擦焊实现该类结构的制造。目前我国正在开发的大型军用运输机的货舱地板和装卸斜台等结构、新一代战斗机的座舱背板、仪器舱地板以及隔板等也正在开发利用搅拌摩擦焊实现高质量、低成本制造,在该类飞机型材结构制造中,搅拌摩擦焊可以代替90%的铆接接头,生产效率可以提高60%,综合成本可以降低30%以上。

第五,飞机方向舵等中空夹心结构搅拌摩擦焊。在中小型飞机的中空夹心结构中,尽管复合材料的应用渐成时尚,但是还有很多产品



图8 中国搅拌摩擦焊中心研制的大厚度搅拌摩擦焊工具