

电磁铆接技术的发展、设备研制及应用探讨

Development, Equipment Research and Application of Electromagnetic Riveting

北京航空制造工程研究所 许国康 高明辉 肖庆东 卜 泳



许国康

北京航空制造工程研究所高级工程师,长期从事飞机数字化柔性装配技术和飞机先进机械连接技术研究,先后发表论文和著作 20 余篇。

电磁铆接技术是 20 世纪 70 年代初开始发展起来的一种新的铆接技术,它利用电能-磁场能-机械能的转换,通过冲击大电流技术获得瞬时冲击载荷并作用于铆钉,铆钉在应力波作用下遵照金属材料的动力学特性成形。电磁铆接在俄罗斯又称磁脉冲铆接。

电磁铆接可以应用于各种材料铆钉的铆接成形,可以实现比较理想的、均匀的干涉配合,形成长寿命、高可靠性的连接。电磁铆接能形成较

电磁铆接能形成较均匀干涉配合连接,可以有效地施铆钛、不锈钢等强度高、屈服比高、对应变率敏感的难成形材料铆钉,形成良好的连接。对于大直径铆钉或厚夹层结构,应用电磁铆接也可以实现良好的干涉配合铆接。结合自动化,电磁铆接还可以用于现代飞机金属和复合材料结构的铆型环槽钉的自动化安装。

均匀干涉配合连接,可以有效地施铆钛、不锈钢等强度高、屈服比高、对应变率敏感的难成形材料铆钉,形成良好的连接。对于大直径铆钉或厚夹层结构,应用电磁铆接也可以实现良好的干涉配合铆接。结合自动化,电磁铆接还可以用于现代飞机金属和复合材料结构的铆型环槽钉的自动化安装。另外,电磁铆接效率高、连续噪声低、能量利用率高。

表 1 是不同材料和直径的铆钉成形所需的压铆力,由于电磁铆接动力头最终作用在设备上的后座力能降低至铆接力的 1/100,与以液压和电动为动力的自动压铆接设备相比,配有低电压电磁铆接动力头的自动铆接装配系统由于不需配备液压系统及用于承受

铆接后座力的弓形架,可大大简化设备的结构(可以利用机器人),充分发挥电磁铆接和自动铆接的优势,铆接质量和效率高、重复性好、设备较小、占地面积小。

电磁铆接的国外发展历史与应用

俄罗斯和美国最早开始电磁铆接技术的研究与开发,并于 20 世纪 70 年代初期研制成功电磁铆接设

表 1 不同材料和直径铆钉所需的压铆力

铆钉直径 /mm	压铆力 /kN			
	铝合金	ML18	ML20MnA	1Cr18Ni9Ti
3.0	10.80	16.68	—	31.39
3.5	14.72	19.62	33.35	44.15
4.0	20.60	27.47	42.18	56.89
5.0	33.35	41.20	56.89	86.33
6.0	38.26	51.01	78.48	—

备。早期的电磁铆接设备的铆枪/工作头上工作电压为数千V的高电压,在一定程度上限制了电磁铆接技术的使用。后来,美国和俄罗斯研制成功了铆枪工作电压不超过500V的低压电磁铆接设备,电磁铆接技术开始在飞机装配中推广应用。

美国格鲁门公司于20世纪70年代初开始将电磁铆接技术用于F-14飞机钛合金结构的铆接,随后波音公司又在波音747(波音727、737、757、767、777、787)等机翼壁板上采用手工电磁铆接进行装配,包括油箱区的密封铆接。波音公司还在F-15飞机上采用电磁铆接技术进行了壁板的手工铆接。20世纪90年代初这种技术开始应用于自动化装配上,并在波音、空客等公司中的应用越来越广泛。

1 电磁铆接技术在波音公司的应用

在波音公司,电磁铆接技术大量用于飞机机翼壁板、翼梁的铆接和干涉螺栓安装,近年来又开始用于复合材料机身(波音787)结构的自动化装配。

波音公司首先在波音747、737、757、767机翼壁板上采用手工电磁铆接进行装配,包括油箱区的密封铆接。20世纪90年代初又将这种技术应用于自动化装配上,并陆续用于波音777、747、767机翼壁板的自动化装配上。由于以复合材料为机体主体材料的波音787飞机自动化装配的需要,Electroimpact(EI)公司通过技术攻关将电磁铆接技术应用于复合材料结构上铆接型钛环槽钉的自动化安装,用于在日本生产的波音787复合材料机身段的自动化装配,该系统造价约900万欧元,已于2007年投入生产应用,如图1所示。

波音公司在将电磁铆接技术应用于飞机机翼壁板装配的同时,与EI公司还联合推行了一个旨在提高装配技术的长期战略计划——ASAT



图1 波音787复合材料机身段的自动化电磁铆接装配系统

计划。ASAT是自动化大梁装配工装的简称,它采用自动化电磁铆接技术来完成机翼梁大型构件的自动化装配。ASAT I型设备在20世纪80年代中期开始投入使用,这套系统最初成功地铆接了波音727的4根后梁,后经过改装,用于当时新设计生产的波音767客机的机翼大梁的铆接。从1990年开始,波音公司又在ASAT I型设备基础上发展第二代自动化大梁装配系统ASAT II,用于波音777机翼4根大梁的装配,该系统是借助于CATIA系统设计和制造的。1994年,波音公司又为新的波音737-700/800机翼大梁装配推出了ASAT III计划,机翼大梁在波音公司西雅图工厂的2个自动化单元上装配,该系统可同时完成左右梁的装配,其中每个单元都有1个床身,床身上有2个支持EI公司研制的低电压电磁铆接动力头的龙门架,每个龙门架有3个线性轴和1根转动轴,而铆接头本身有16根数控制轴。图2为美国大型军用运输机C-17生产线上的E5000-ASAT IV自动化翼梁电磁铆接柔性装配系统。



图2 E5000-ASAT IV自动化翼梁电磁铆接柔性装配系统

2 电磁铆接技术在空客公司的应用

从20世纪90年代开始,空客公司在A320、A330、A340、A380等系列飞机的机翼壁板自动化装配上普遍采用了电磁铆接技术。在空客飞机的机翼壁板制造中,电磁铆接技术除用于自动铆接外,还用于金属结构铆接型环槽铆钉环圈的自动安装。

早在1990年,EI公司就为英国TEXTRON飞机结构公司(现为沃特公司)提供了1台价格为230万美元的自动电磁铆接装配单元(AERAC),用于A330/A340机翼壁板(左、右翼面)的制造。1991年又投资了第二台AERAC的制造。2009年,EI公司又为沃特公司开发了第二代AERAC系统,用于A340和A380机翼壁板的自动化装配。

图3是EI公司为空客英宇航公司(BAe Airbus)配备的E4100自动电磁铆接装配系统,用于A340-500/600飞机的机翼壁板装配。这套系统安装在威尔士的空客机翼制造和总装厂,它包括2台用于上下壁板装配的E4100机翼壁自动化装配系统。该系统投资为500万英镑,设备重50t(而液压式机翼铆接机重达100t),可将桁条连接到机翼壁板上,



图3 A340飞机E4100机翼壁板自动电磁铆接装配系统

并可安装部分对接搭板上的紧固件。设备可安装铆钉和环槽铆钉。系统在 1997 年末投入使用,采用新设备后,铆接成本降低约 30%,到 1999 年已达到每月生产超过 22 套机翼的生产效率。

2003 年,空客公司又投资了 1 台 E4150 机翼壁板电磁铆接柔性装配系统,该系统柔性化程度更高,可实现从 A319 至 A340/600 型飞机机翼壁板的自动电磁铆接装配。

空客公司 A320 系列飞机(A319/A320/A321)是非常成功的 150 座级飞机,世界各国航空公司的需求量非常大,空客公司为满足 A320 系列飞机的高效生产需求,于 2000 年配置了 1 台 E4000 型机翼壁板自动化电磁铆接设备。2006 年又配置了 1 台更先进的 E4320 型机翼壁板自动化电磁铆接设备并安装在空客公司在英国布雷顿的工厂,用于满足 A320 机翼壁板的生产需求。

3 电磁铆接技术在俄罗斯的应用

俄罗斯对电磁铆接技术也进行了大量研究,并运用在伊尔-86、图-154 等飞机、发动机、运载火箭的装配生产上,先后开发和生产了 YMK-6AM、YMK-8、YMKKC、MMK-6 等型号的 50 余台低电压铆枪工作电压不超过 380V)电磁铆接设备。俄罗斯研制的配备有加热系统和低电压电磁铆接动力头的 YMKKCH、YMKKCH-3 型自动铆接设备已用于发动机燃烧室筒体 Cr-Ni 钢铆钉的自动热铆。20 世纪 90 年代中后期又研制了一套长度达 12m 的自动电磁铆接装配系统,用于飞行器圆筒形壁板的自动化装配。

便携式低压电磁铆接设备的研制

电磁铆接技术由于具有能实现较均匀的干涉配合连接(连接疲劳寿命高)、低噪声和低振动、效率高、适用于钛合金和复合材料结构及大直

径厚夹层结构铆接、动力头轻巧和易于实现自动化、适用于干涉螺栓和环槽钉安装等优势,已在国外广泛应用。

国内目前面临着系列新一代军民用飞机的研制,新一代飞机要求结构长寿命、大量采用复合材料和钛合金等轻质材料,并需要提高装配的自动化水平,以满足质量、高效率研制和生产的要求。

长寿命要求新一代战斗机寿命达到 6000 飞行小时以上(如 F-22 达 8000 飞行小时),大型客机要求寿命达到 9000 飞行小时,这就要求在新一代飞机研制中,铆接方法要采用较常规的压铆和锤铆连接接头寿命更高的方法,还要大量采用干涉连接技术,保证大直径和厚夹层结构的铆接质量,同时提高飞机装配的自动化水平。电磁铆接及其自动化技术正是解决这一问题的重要手段之一。

在新一代军民机中,大量使用复合材料和钛合金等新型材料。例如从美国典型的第四代战斗机 F-22、F-35 中各种材料的使用情况中可以发现,复合材料和钛合金在机体结构中所占的比重非常高(其总和比重超过了 50%)。国内大型客机将在中央翼盒、尾翼(垂尾、平尾)、升降舵、方向舵等构件上应用复合材料。新一代军民机复合材料和钛合金结构的大量应用,结构的铆接和干涉螺栓、环槽钉的安装及其自动化对连接装配技术提出了更高的要求,从而对电磁铆接技术提出了急迫的需求。

目前在国内生产的新型飞机中,复合材料结构平尾存在大量铆接结构,常规的压铆和锤铆方法难以得到满意的结果;同时,机身钛合金结构采用热铆方法,常因为铆钉过热而导致连接缺陷,影响飞机装配质量。另外,军民用飞机装配生产中大量采用气动铆枪进行手工铆接和干涉螺栓安装,航天领域运载火箭装配生产中

也主要采用气动铆枪进行手工铆接,噪声和振动都非常大,从而导致铆接装配现场的劳动条件和现场环境非常恶劣,影响装配现场工作人员的身体健康和工作效率,同时质量不稳定,而应用电磁铆接技术可以大大减少铆接装配现场的噪声,改善工作环境和装配质量。

因此,国内新一代军民机要实现结构长寿命,保证装配质量稳定,改善送装配现场条件,低电压电磁铆接及其自动化技术是解决这些问题,满足型号研制和生产需求的一种有效手段。国内航空航天领域的电磁铆接技术的应用需求见表 2。

表2 电磁铆接技术的应用需求

产品	装配件	应用范围
大型飞机	机身机翼壁板、翼梁、机身半壳体和舱段、翼盒	铆接、干涉螺栓安装和环槽钉安装
新支线客机	机身机翼壁板、平尾壁板、机身半壳体和舱段、翼盒	铆接、干涉螺栓安装
新一代军机	机身壁板、机身和翼盒部装	铆接、干涉螺栓安装
大型运载火箭	筒体	铆接

北京航空制造工程研究所研制的 BEI100 型低压电磁铆接设备的主要技术指标如表 3 所示。自主研发

表3 BEI100型低压电磁铆接设备主要技术指标

主要技术指标		特征
铆接能力 (可铆铆钉直径)	铝合金	最大 6 mm
	钛、钢	最大 4mm
铆接效率		最大 10 次 /min
设备充电电压		0~1200V 可调
铆枪工作电压		脉冲电压峰值,不超过 380V
脉冲电流周期		约 0.5ms
铆枪		重量不超过 4.5 kg,多重防护
设备控制		数字化控制

的 BEI100 型低压电磁铆接设备定位于能够实现最大 6mm 直径铝合金铆钉、4mm 直径钛铆钉的铆接,适用于新一代军民飞机机身、机翼等机体绝大部分结构的铆接和干涉螺栓安装,铆枪重量不超过 4.5kg,适于手持操作,采用数字量控制,便于实现自动化铆接。

考虑到研制的低压电磁铆接设备要适用于工程应用,在设备原型机基础上,以工业设计为基础改进了设备的外形设计,同时按高可靠性与易维护性、操作简便、装配工艺性好、强化框架、易于移动和吊装等要求对电源箱的结构进行了改进设计,便于使用,如图 4 所示。



图4 BEI100型低压电磁铆接设备

经工艺试验和设备检验, BEI100 型低压电磁铆接设备达到了设计技术指标要求,1 次脉冲最大能实现 $\phi 6\text{mm}$ 直径铝合金铆钉的铆接,满足复合材料和钛合金结构的铆接要求, $\phi 4\text{mm}$ 铝铆钉的铆接效率达到了 10 次/min。研制的 BEI100 型设备受到主机厂的欢迎,首台设备并已交付主机厂使用。铝合金铆钉和钛铆钉在设备上的铆接参数的参考值见表 4。

表4 BEI100 型电磁铆接设备铆接参数

铆钉规格	铆钉直径/mm	充电电压/V	顶铁质量/kg	备注
铝合金平头铆钉、沉头铆钉	4	750~850	2.5	1次放电铆接
	5	930~950	2.5	1次放电铆接
	6	1170~1190	5.0	1次放电铆接
钛和钛合金平头铆钉、沉头铆钉	4	720~740	2.5	2次放电铆接

低压电磁铆接设备及工艺的应用探讨

1 在手工装配上的应用

BEI100 型低电压电磁铆接设备为可移动式手持操作设备,工作方式包括对铆(2 把铆枪协同铆接)、正铆(1 把铆枪对铆钉钉杆一侧成形,钉头一侧用顶铁)和安装,可应用于:

- 普通埋头铆钉和凸头铆钉的铆接;
- 补偿头铆钉和冠状铆钉的铆接;
- 镦埋头铆钉、无头铆钉的铆接;
- 干涉螺栓、干涉高锁螺栓和干涉环槽钉的安装;
- 大直径铆钉和厚夹层结构的铆接;
- 整体油箱的快速密封铆接;
- 复合材料和钛合金结构的铆接。

从产品对象上看,手工电磁铆接技术可应用组合件(机身机翼壁板、翼梁、机身组合框等)装配、部件(翼盒、尾翼、舱段等)装配和总装对接(机身段对接、机身机翼对接等)等飞机装配的不同阶段。

2 在自动化柔性装配上的应用

低压电磁铆接技术由于动力头轻巧、电动控制和高速并能适应铆接、干涉螺栓安装和镦铆型环槽钉成形,与常规的压铆和锤铆相比有很大的优势。下文分析了 BEI100 型设备用于自动化柔性装配的几种情况。

(1) 应用于飞机壁板、梁、框等组合件的自动化装配。

移动定位平台可采用类似 EI 公司 C 型框结构、关节机器人可并联机器人方案。

(2) 机翼、机身、筒体部装中的自动电磁铆接和安装。

机翼部装、机身部装可以采用电磁铆接实现自动化柔性装配。

(3) 在移动系统中的自动安装应用。

由于动力头轻巧、后座力小,可用于人工操作,因此电磁铆接和安装技术有潜力集成于柔性导轨设备、爬行机器人、AGV 移动式关节机器人的移动系统中,进行自动化铆接和安装。

(4) 在航天领域的应用。

低压电磁铆接设备和工艺可用于大型运载火箭壁板、筒体的自动化铆接装配中。

3 在航空航天产品装配中应用效益

低压电磁铆接设备和工艺应用于手工铆接和自动化装配中,可以获得如下效益:

- 保证结构长寿命要求;
- 提高铆接质量稳定性,保证结构可靠性;
- 提高装配效率;
- 降低铆接噪声和劳动强度,减少振动,发送装配现场劳动条件;
- 解决大直径铆钉铆接的难题;
- 提高装配技术水平,进而提高产品竞争力。

结束语

大型客机如波音 737、747、757、767、777、787 和空客的 A320、A330、A340、A380 都大量应用了电磁铆接技术,而且都用在具有高负载、高疲劳要求的部位,如机翼壁板、翼梁和复合材料机身段。

目前,国内研制的低压电磁铆接设备已达到工程应用水平,在设备结构设计和数字控制、关键元器件配套、工艺等方面都有其独特的优势。可以预计,通过不断改进、完善和推广,研制的低压电磁铆接设备将在国内新一代军民机研制和生产中,在保证产品的长寿命要求、提高装配质量和效率、促进装配生产劳动条件的改善等方面发挥应有的作用。

(责编 良辰)