

复合材料 Invar 模具制造技术分析

Manufacturing Technology Research on Invar Composites Mould

中国商飞上海飞机制造有限公司 王玉华 陈洁 占小红 刘红兵 王苏明 李昊 邓景煜

[摘要] 复合材料以比重小、强度高、疲劳性能好等优点在航空领域得到越来越广泛的应用。影响复合材料零件加工制造的一个重用因素就是,复合材料在高温真空成型后恢复到常温自然条件过程中产生不可控制的变形。而复合材料成形模具的材料选择与设计,则是能有效控制复合材料变形的重要手段之一。Invar 钢的热膨胀系数与复合材料相近,采用 Invar 钢作为复合材料制件的成型模具,可有效减少复合材料构件成型过程中的变形。本文就 Invar 钢模具制造过程中焊接、机加以及热处理等工艺展开讨论,为最终制造加工出符合复合材料模具要求的 Invar 钢模具提供技术支持和指导。

关键词: 复合材料 模具制造 Invar 合金

[ABSTRACT] Composite material with small specific gravity, high intensity and good fatigue performance and other advantages in the aviation field is getting more and more application. An important factor that effects composite material mould manufacturing is uncontrolled deformation which is generated during high temperature vacuum forming back to natural temperature. The selection and design of composite mould material is effective to control the deformation. Thermal expansion coefficient of Invar steel is similar to composite material. So Invar steel is choosed as composite forming die which can reduce the deformation during composite mould process. In the paper, Invar steel mould manufacturing process of welding, machining and heat treatment process are discussed. And it can provide technical support and guidance for the final manufacturing process to meet the requirements of composite mould.

Keywords: Composites Mould manufacturing Invar alloy

1 复合材料模具背景介绍

复合材料由于其低密度、高强度、高模量和可设计性等优点在飞机零件上得到了广泛应用,成为继铝、钢和钛合金之后重要的结构材料,其应用范围和水平成为

衡量飞机先进性的重要指标之一^[1]。如 B787 的复合材料用量为 50%, A350 的复合材料用量为 52%。

随着复合材料构件在飞机主承力结构上的应用(如 B787 的机翼和机身、A400M 的机翼采用复合材料)和飞机尺寸的变大(如 A380 的垂尾长度达到 14m),对复合材料成型用模具的材料提出了更高的要求。先进复合材料的加热加压生产条件要求模具材料具备不同特性,其中较重要的特性包括^[2]:

- (1) 对基体树脂高硬化温度及变化温度的稳定性;
- (2) 和所成型的复合材料一致的热膨胀系数;
- (3) 良好的真空稳固性;
- (4) 尺寸稳定性;
- (5) 适当的加热、冷却速率;
- (6) 制造成本,包括机加工、热处理工艺所产生的成本等。

目前,有几种材料都达到了满意的模具使用要求,但需要找到一个性能平衡点确保使用该模具能生产出高质量、尺寸稳定的复合材料零件。常用的复合材料构件的成型模具使用的材料及其特点如表 1 所示。

表1 复合材料成型模具使用的材料及特点

材料	模具成本	模具的耐用性	材料热膨胀系数 / $\times 10^{-6}$
普通钢	较低	好	12
复合材料	高	较差	可设计
殷钢	较高	好	0.5 ~ 2.5
铝	较低	好	21

普通钢(Q235)模具由于具有成本较低、耐用性好和热膨胀系数较小等优点而成为目前广泛使用的复合材料批生产的成型模具。但随着复合材料零件尺寸的变大,普通钢模具的热膨胀系数与复合材料零件热膨胀系数(一般是 $2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)不一致所导致的问题逐渐暴露出来。由于热膨胀系数不一致,导致复合材料零件尺寸与理论尺寸不一致、存在内应力、装配不协调、表面皱缩等一系列问题,这些问题在工程上是完全不能被接受的^[3]。而复合材料模具由于与复合材料零件热膨胀系数都较小,且相匹配,可很好地解决复合材料零件尺

寸稳定性和零件成型内应力的问题,但复合材料基体模具易损坏,使用寿命短,同样受复材成型工艺特点的限制,而且有些模具结构复合材料做不到,特别是不易脱模需分块的复合材料零件。因此,复合材料基体模具不能满足所有结构形式的复合材料构件的需要,另外复合材料模具是一种不可逆的工装,一旦成型后就无法返修^[4]。Invar 钢材料膨胀系数低,与复合材料模具相比更易于维护管理,使用寿命长,适合于批量生产,所以大型复合材料构件的成型模具材料采用 Invar 钢是必然的选择,航空复合材料构件(B787 梁、典型引擎机舱)也都选用 Invar 钢模具。

目前,由于 Invar 钢模具尺寸较大,很难一次成型,焊接是 Invar 钢连接的一种最为普遍的方式,可采用钨极气体保护焊、熔化极气体保护焊、焊条电弧焊、埋弧焊、激光焊等方式进行焊接。

目前, Invar 钢最常用的焊接方式是气体保护焊,存在的问题主要是焊接过程中金属流动性差,浸润效果差,需要采用焊接技巧进行克服,否则会产生气孔、裂纹、咬边等缺陷,严重影响焊接质量,同时也会影响模具的气密性检验和模具表面质量,因此针对 Invar 钢材料开展焊接缺陷控制工艺研究显得极为重要。同时对于大型复杂的焊接结构,构件结构、焊接工艺、施焊条件等对焊后构件的变形及残余应力的分布具有很大的影响,目前我国民用 Invar 钢模具焊接制造刚刚起步,生产中焊接问题较多,其中 Invar 钢模具焊接缺陷控制和变形控制问题尤为突出。

同时 Invar 钢的化学性质活跃,热传导性能很差,热传导系数只有 45 钢的 1/4,它在机械加工时,其韧性和塑性很强,加工硬化非常严重,断屑困难,使刀具/切屑接触面温度升高快,温度不易向外散发,并且在加工过程中断屑容易粘接在刀刃上,从而导致刀具寿命普遍很短。然而由于 Invar 钢材料的特殊性,涉及到航空航天等国防众多领域,目前针对 Invar 钢切削加工(尤其在高速切削加工方面)的文献非常少,因此,开展 Invar 钢的高效切削加工技术研究,提升复合材料制造的综合技术能力尤为重要。

2 国内外研究现状和发展趋势

复合材料在波音和空客飞机的应用已拓展到主承力结构,相应的复合材料构件的尺寸很大,具体情况见表 2。其复合材料构件成型用模具(芯模)广泛地使用殷钢材料。

国内关于殷钢的复合材料成型模具的报道较少。何晓蓉^[5]在《精密殷钢模具加工工艺》中提到用殷钢制造的天线反射器,但其尺寸较小,直径只有 0.5m,其余

未见相关报道。究其原因,一方面是由于国内航空复合材料构件的尺寸较小,对殷钢的需求不强烈;另一方面,殷钢模具较高的成本也阻碍了其在国内的应用。但随着国内大飞机的立项,对大尺寸复合材料的需求会带动对殷钢模具的需求。

表2 欧美飞机复合材料零件的尺寸

复合材料零件	尺寸/m
B787	机身 5.7(直径)
A380 垂尾	14
A400M 机翼	20
B787 机翼	27

3 复合材料 Invar 钢模具的制造加工工艺分析

复合材料 Invar 钢模具的整个制造加工工艺过程分析并总结如下:模具支架拼插(Interlock)并焊接→模具支架与型面接触部分机械加工,并最终加工出与型面外形吻合的形状→型面下料并滚弯成形(或折弯成形)→型面各部分进行拼焊→型面和支架之间进行焊接→热处理→对模具型面表面进行粗加工→热处理→对模具型面表面进行精加工→模具型面表面抛光→最终成形出复合材料用模具。

由于复合材料模具需要随复合材料制件同时进热压罐加热加压,在模具表面直接铺复合材料制件,因此对其模具型面气密性、模具型面表面质量、模具型面变形、模具受热均匀性等提出要求,具体指标为:应满足轮廓度在 $\pm 0.2\text{mm}$ 内,且保证模具不漏气;模具的气密性在常温和高温下(一般不超过 200°C)均满足复合材料制件的加工要求,模具表面粗糙度 $Ra1.6\mu\text{m}$,且模具表面无微孔等要求。具体结合最终模具要求,将模具型面制造加工过程焊接、机加、热处理 3 个工艺进行特点分析。

3.1 Invar 钢焊接工艺

Invar 钢焊接一般选用气体保护焊工艺进行焊接, Invar 合金属于镍基合金,液态焊缝金属流动性差。镍基合金无法如钢焊缝金属通过增大焊接电流改进焊缝金属的流动性,若增加电流,反而会起有害作用,这是镍基合金的固有特性,因此焊接过程中建议采用小电流方式进行焊接。

此外焊接的电弧要尽量短,且建议根据焊件厚度选择合适的坡口形式和坡口角度。焊接过程中同时要注意控制层间温度,以防止热影响区金属因经受高温作用的时间过长导致晶粒粗大。焊接速度应按板材的厚度确定,以保证足够的熔深、焊缝宽度和焊缝的致密性。

焊接速度过高或过低都会造成焊缝出现气孔等缺陷。

在进行打底焊、堆焊和盖面焊时,焊接电流的选择对于最终焊缝质量起到决定性作用,在进行打底焊时,要根据焊接填充材料直径和焊缝间隙对焊接电流分别进行调整,只有选择合适的焊接电流才能获得好的焊接质量。

为了防止焊接裂纹产生,焊前对焊件和焊丝表面含有硫和铅的污物彻底清除,选取合理的装焊顺序和焊接热输入等。预热和后热对防止结晶裂纹作用不大,一般不采用。与低碳钢、低合金钢焊缝相比,镍和镍基合金产生气孔的敏感性更大些,既可能产生氢气孔,也可能产生一氧化碳气孔和水蒸气气孔。镍基合金产生氢气孔的原因是:焊接熔池在高温液态下能溶解较多的氢,如果焊接时焊丝和焊件表面有水分、油污、铁锈等氢源,氢将大量溶解。但当温度下降时氢的溶解度降低,因此氢将析出。由于镍基合金固溶相温度间距小,熔池流动性差,在熔池冷却凝固结晶的过程中氢气来不及逸出熔池,因此极易产生氢气孔,为了防止产生气孔,焊前必须严格清除焊丝和焊件表面的铁锈、油污、氧化皮、各种涂料、油漆等污物^[6]。

同时通过有无背保护措施的焊接试验件对比发现(图1):没有背保护的焊接试验件背面焊缝发生凸起,且背面氧化现象明显,因此在焊接过程中建议打底焊时一定要用气体进行背保护。

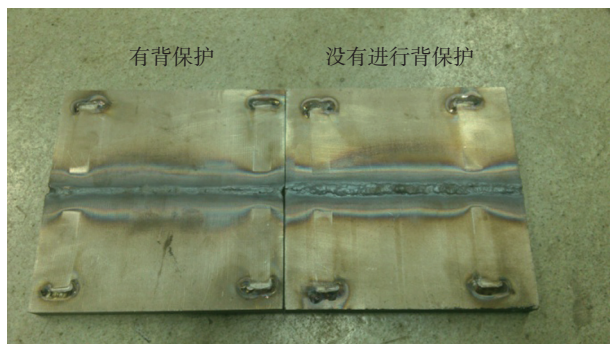


图1 有无背保护焊接试验件
Fig.1 Welding test parts with back protection or not

在研究开展 Invar 钢焊接工艺的同时,为了提高焊接质量稳定性和生产效率,针对 Invar 钢模具的自动化焊接生产,筹备建设自动化焊接平台,如图 2。该机器人焊接系统采用半开放式工作设计,采用 TIG 和 MIG 焊接电源,两种不同焊接工艺可通过自动换枪装置实现自动更换焊枪以实现不同工艺的同时焊接。

整套系统主要由 6 个部分组成,如下所示。

- (1) 焊接机器人: 其最大负载为 10kg;
- (2) 焊接设备: TIG、MIG 焊机带自动送丝机;

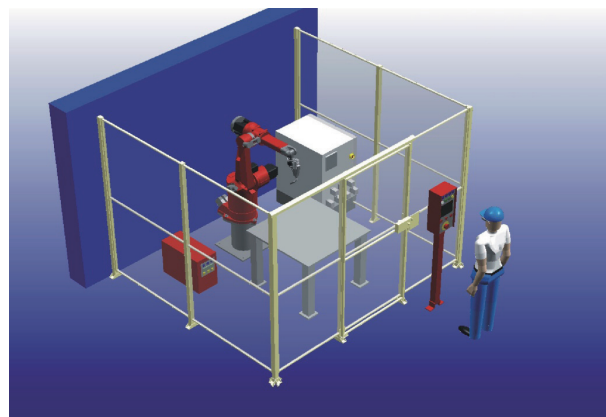


图2 自动化焊接平台示意图
Fig.2 Schematic diagram of automation welding platform

(3) 换枪装置: 气动自动换枪装置,一拖二,含焊枪防撞器;

(4) 安全防护: 采用铝合金型材搭建的标准焊接防护围挡;

(5) 净化装置: 对操作空间进行废气、灰尘净化处理;

(6) 控制系统: 采用机器人控制柜作为总控系统。

整套系统的主要特点: 采用自动换枪装置,可通过一次编程在一个工件上实现不同工艺的自动焊接;机器人有效运动半径可达 2000mm;焊机可实现不同材料的焊接,如不锈钢、钛合金、铝合金等其他材料;配置含两套送丝系统,方便焊接时不同工艺的自动切换;同时焊枪防撞器安装采用气动驱动并安装于焊枪侧,不仅可最大程度地节省成本,还可增加焊枪的保护效果。

3.2 Invar 钢机械加工工艺

由于 Invar 合金含镍较高,提高了钢的淬透性和可淬性,提高了钢的耐气性、耐蚀性和耐磨性。通过 Invar 合金的化学成分、金相组织及力学、物理性能分析可知, Invar 合金的切削加工性与奥氏体不锈钢类似,但比奥氏体不锈钢还要难加工,故 Invar 合金在加工中主要具有切削力大、切削温度高、刀具磨损快等特点,因而 Invar 合金在加工过程中出现软、粘和很大的塑性,切屑不易折断,增加了切屑和前刀面的摩擦,加剧了刀具的磨损,降低了刀具的耐用度和工件的加工精度,因而在加工 Invar 合金加工时,必须采用高性能的硬质合金涂层刀具和新的加工方法。

对于 Invar 钢的机械加工工艺,建议 Invar 钢加工过程中选择大前角、大后角、大螺旋角刀具^[2]。因 Invar 钢材料与一般的碳钢相比硬度要高,故机械加工过程中采用相对碳钢高的转速、低的切削进给量进行加工,最终

(下转第 99 页)

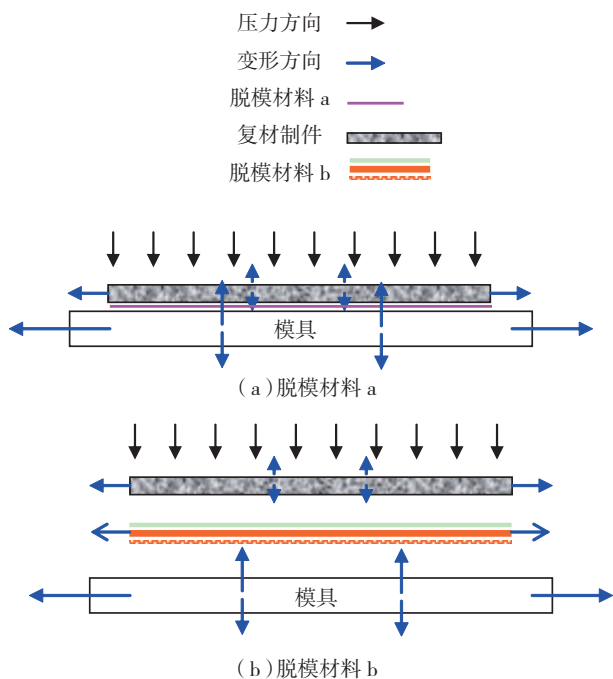


图7 不同脱模介质示意图
Fig.7 Compare of different molting medium

次生缺陷再无发生,脱模介质的选择对抑制次生缺陷的产生起到了关键的作用。

2 结论

通过控制壁板的存储、转运、翻转方式,以及更改了脱模介质(将脱模介质 a 更换为脱模介质 b),杜绝了胶接面次生缺陷的产生。后续生产的复合材料壁板未发现胶接面次生缺陷,提高了生产效率和产品合格率,缩短了生产周期,保证了产品的交付进度。同时提出以下建议:

(1)大型复合材料构件高温下成型,要根据其结构特点和模具状况等多方面因素考虑,合理选择脱模介质;

(2)对于大型复合材料构件的转运和存放,需要匹配满足构件刚度和提供足够保护措施的工装器械;

(3)将影响大型复合材料构件的缺陷因素和成型经验,及时与我所相关技术人员分享和交流,并选择性的反馈给复材构件设计科研院所。

参考文献

- [1] 寇哲君,戴棣,曹正华. 复合材料结构固化变形预测. 材料工程,2007(21): 225-228.
- [2] 岳广全,张博明,杜善义,等. 模具对热固性树脂基复合材料固化变形的影响. 玻璃钢/复合材料,2010(5): 62-65.

(责编 深蓝)

(上接第 95 页)

通过选择合适的刀具及材料,制定合理的切削要素和切削用量,开展 Invar 钢焊件粗加工、半精加工以及精加工等研究。

3.3 Invar 钢热处理工艺

Invar 钢材料在机加工前,必须进行退火处理以调整材料内部结构。同时,机加工会给材料施加内应力,这些内应力通常是不均匀分布的。为了获取稳定、准确的尺寸,必须进行去应力退火,因此需要在不同阶段对 Invar 钢进行相应的热处理,如 Invar 钢材料在大面积成型或焊接后进行完全退火(推荐 1h850℃空冷或炉冷);在粗精加工之间或者小的焊接修补后进行去应力退火(推荐 2h315℃空冷或炉冷)^[2],具体的热处理温度需根据结构尺寸进行具体分析。

4 结束语

对于复合材料 Invar 钢模具制造工艺——焊接、机加、热处理等工艺分析,总结如下:

(1)由于 Invar 钢的热膨胀系数与复合材料相近,采用 Invar 钢作为复合材料制件的成型模具可很好地解决复合材料零件在高温真空成型后回复到常温自然条件过程中产生不可控制的变形问题;

(2)对于大型复合材料 Invar 钢模具,由于原材料加工最大尺寸以及成型设备加工能力限制,势必采用焊接工艺将不同的板料进行连接,因此 Invar 钢的焊接工艺研究显得极为重要。Invar 钢焊接一般选用气体保护焊工艺进行焊接,焊接过程中建议采用小电流方式进行焊接;

(3)对于 Invar 钢的机械加工工艺,建议 Invar 钢加工过程中选择大前角、大后角、大螺旋角刀具。因 Invar 钢材料与一般的碳钢相比硬度要高,故机械加工过程中采用相对碳钢高的转速,低的切削进给量进行加工。

参考文献

- [1] 刘君伍,黄建云. 新型复合材料夹层结构及接头在机身结构中的应用前景. 复合材料制造,2008(25):129-130.
- [2] ArcelorMitta 公司. INVAR[®] 钢模具用于复合材料零件生产,2009.
- [3] 杨博,李宏,曹正华. 殷钢在复合材料成形模具中的应用. 玻璃钢和复合材料,2010(6): 68-69.
- [4] 刘招娣. 大型薄壁 Invar 钢复合材料模具制造技术. 电加工与模具,2009(1): 47-50.
- [5] 何晓蓉,高建军. 精密殷钢模具加工工艺. 辽宁: 模具工业,2002(5): 56-58.
- [6] 《焊接工艺操作技巧丛书》编委会. 氩弧焊工艺与操作技巧. 辽宁: 辽宁科学技术出版社,2010: 193-197.

(责编 亿霖)