

钛合金层合梁 SPF/DB 制造工艺研究

Process Research on SPF/DB for Titanium Alloy Laminated Beam

北京航空制造工程研究所 李晓华 韩秀全 邵杰
空军驻北京地区军事代表室 张军

[摘要] 钛合金层合结构因具有较高的损伤容限而受到重视,并成为超塑成形/扩散连接技术应用的一个新方向。通过采用先超塑成形再进行热等静压扩散连接成为整体构件的 SPF/DB 组合工艺方法,可以实现钛合金层合结构波纹工字梁的制造,其外形尺寸、微观组织和性能等基本能满足设计使用要求,但其工艺参数仍有待通过深入研究进一步优化。

关键词: SPF/DB 层合梁 钛合金

[ABSTRACT] The laminated structure part has achieved special attitude for its high damage tolerance, and become a type of new application of SPF/DB technology. The laminated "I" beam of titanium alloy can be manufactured by SPF/DB combined technology as the part is first superplastic formed and then is diffusion bonded to an integrated structure. The size, microstructure and property of the part can conform to design requirements for application. But more research must be carried out to optimize the technical parameters.

Keywords: SPF/DB Laminated beam Titanium alloy

随着航空工业的发展,对飞机的使用寿命要求越来越高,作为主承力结构的钛合金构件,其耐久性和损伤容限特性对飞机使用寿命起着关键性作用。原梁、框类结构件一般由厚板或锻件通过数控机加制成,其制造工艺简单,但材料利用率低,抑制裂纹扩展能力差。为改善此类构件的损伤容限特性,可以采用损伤容限特性较好的新型钛合金材料,而采用能提高损伤容限特性的钛合金结构形式则是更为有效的途径^[1-2]。超塑成形(SPF)及超塑成形/扩散连接(SPF/DB)作为一种低成本、高效益、近无余量的先进制造技术,已经广泛应用于航空、航天飞行器零部件的生产^[3-4]。在钛合金超塑成形/扩散连接层合结构中,由于扩散连接界面的存在,对表面裂纹扩展具有显著的抑制作用,从而改善结构的耐久性、提高结构的安全性。钛合金层合结构也将成为超塑成形/扩散连接技术应用的一个新方向。本文通过钛

合金波纹工字梁模拟件,初次探索了钛合金层合结构梁的 SPF/DB 制造工艺路线,验证了该工艺的可行性,解决了该技术中存在的技术难点,并研制出 SPF/DB 层合梁样件,该制造工艺的研究成果为 SPF/DB 技术在机翼梁、框等异型截面构件上的应用奠定了技术基础。

1 试验方案

1.1 零件结构特点

模拟件为波纹腹板工字梁,其结构形式见图 1。工字梁腹板厚度为 1.6mm,梁缘条厚度为 2.4mm,梁腹板前后两端为直段,中段采用正弦波形状,波峰值为 30mm,梁腹板高度为 80mm,梁缘条宽度为 50mm,梁长度为 130mm。

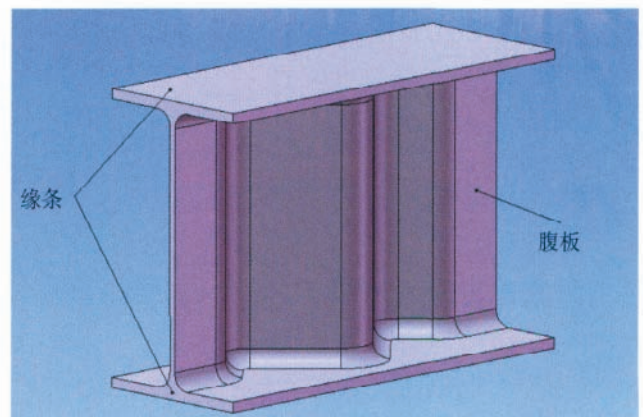


图1 梁的结构形式
Fig.1 Structure of beam

1.2 工艺技术方案

采用超塑成形/扩散连接工艺制造层合结构梁,使梁的腹板和缘条均为典型的层合结构,因此,设计腹板为左右两层腹板结构,缘条为 3 层结构,单层板厚为 0.8mm,如图 2。

根据分析确定层合梁超塑成形/扩散连接的工艺路线,首先分别进行左右腹板的超塑成形,可采用单层板超塑成形工艺,在超塑模具中进行气体胀形,制造单层波纹腹板梁左右件;然后进行缘条与腹板两两之间

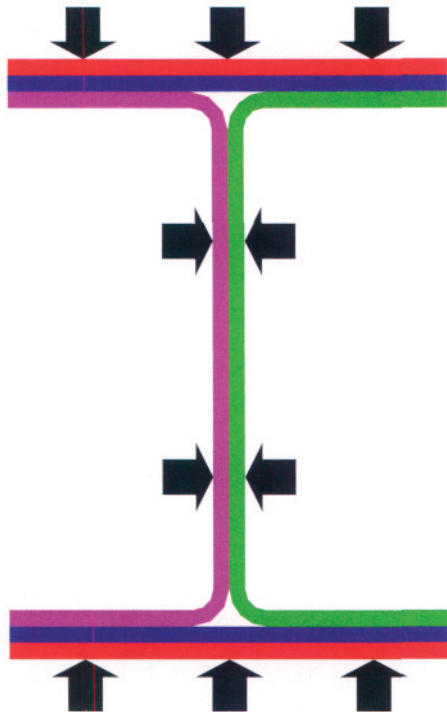


图2 层合梁的制造方法示意
Fig.2 Manufacturing method of laminated beam

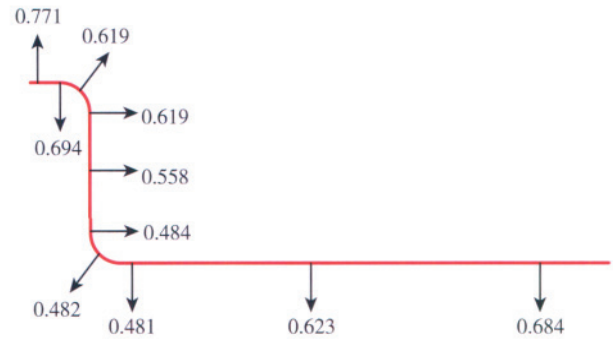


图3 平板超塑成形时的壁厚分布
Fig.3 Wall thickness distribution of plate during superplastic forming

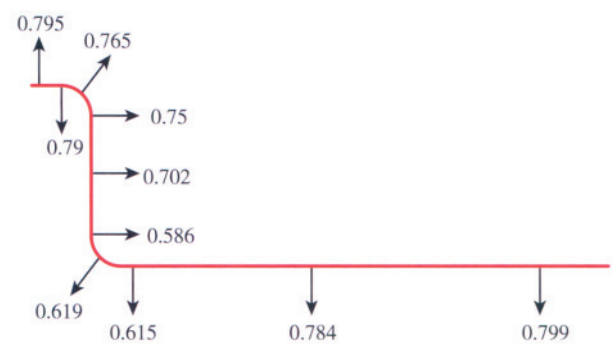


图4 预成形板超塑成形时的壁厚分布
Fig.4 Wall thickness distribution of preformed plate during superplastic forming

的扩散连接,采用整体热等静压扩散连接复合的方式进行,利用密封模具实现热等静压的压力室功能,并将缘条与腹板、左右腹板封焊成内部真空的口袋,利用气体压力实现整体结构的扩散连接,最终完成层合梁的制造。

2 工艺难点与解决措施

2.1 壁厚均匀性的控制

从力学的角度,层合梁要求缘条处板料壁厚均匀,或者在缘条与腹板相连的根部壁厚略大,从而有利于增强梁的疲劳、静力强度等性能,而实际腹板超塑成形过程中,根部圆角处的变形量最大,是成形件壁厚最薄弱的地方,因此在腹板超塑成形之前增加了预成形过程,即采用热成形的方法预成形腹板成U型件,然后再进行超塑成形制造带波纹的腹板,从而大大减少毛坯的变形量,有效地改善壁厚的分布。

采用MARC有限元软件对变形过程中的壁厚减薄进行二维有限元模拟。图3和图4分别为平板超塑成形时和预成形板超塑成形时典型截面的壁厚分布,左右对称,取一半进行分析。由图3、4可以看出,平板超塑成

形时,板料壁厚分布不均,最大减薄量达40%,预成形板再超塑成形时,板料壁厚分布均匀性有明显的改善,壁厚最薄点在底部圆角于垂直段相切处,减薄量最大仅为27%。

2.2 根部圆角的保留

梁根部的圆角是保证梁稳定性的关键结构。缘条与腹板的圆角在根部形成三角区,因缘条与腹板之间的扩散采用热等静压方法实现,腹板的圆角将受压直到填

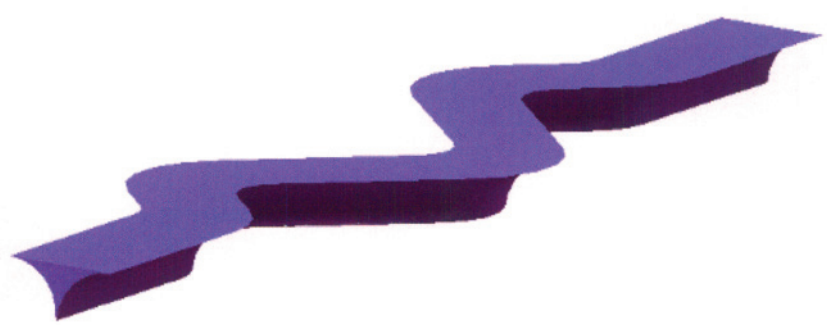


图5 层合梁三角区填充条示意
Fig.5 Diagram of filler in triangle zone of laminated beam

满整个三角区,因此在热等静压前需将三角区填实以保留根部圆角。此处,采用TC4厚板加工填充条,如图5所示,填充条最终与相接触的部位扩散连接成一体。

2.3 外型尺寸精度的保证

热等静压扩散前将零件封焊成一个真空口袋,缘条与腹板之间和左右腹板之间均需氩弧焊,焊缝过长必将导致梁的翘曲,此外梁在热状态下也容易受自重而变形,而梁缘条的上下表面为配合面,需要保证其型面精度。因此在腹板左右空腔处需配做模具镶块作为支撑面,热等静压过程中层合梁上下表面与模具的内腔型面相接触以保证外形精度。

2.4 大面积扩散连接质量的控制

SPF/DB钛合金层合结构为整体扩散连接结构件,对于这种多层、大面积板料扩散连接而言,确保零件各个部位的扩散连接质量是研究的关键之一。温度、压力和时间是扩散连接的主要影响因素。因此,在钛合金层合梁研制过程中,需综合考虑扩散连接温度、压力与时间之间的参数对应关系,通过适当提高扩散连接温度、压力以及延长扩散连接时间来保障大面积扩散焊的实现,从而保证扩散连接质量。

3 试验过程

3.1 试验条件

材料选用目前在航空航天领域中广泛应用的Ti6Al4V(M)(简称TC4)超塑专用细晶板材(GJB2921-97),厚度0.8mm,该合金为中等强度 $\alpha + \beta$ 两相钛合金,其长时间工作温度可达400℃,具有良好的超塑成形及扩散连接性能。

梁腹板预成形采用250T热校形设备,腹板超塑成形和层合梁扩散连接在150T超塑成形设备上完成。层合梁模拟件研制过程中需使用3套专用模具,分别用于腹板预成形、腹板超塑成形和层合梁的热等静压扩散连接,模具材料采用ZG35Cr24Ni7SiN制造。

3.2 工艺流程

根据以上分析和设计,钛合金层合梁模拟件超塑成形/扩散连接工艺流程方案图6所示。

梁腹板预成形主要工艺参数为:预成形温度(650±10)℃,毛料在模腔预热1~2min,保温保压10±2min。腹板超塑成形主要工艺参数为:超塑温度880~930℃,最大压力1.5MPa,加压曲线如图7所示。

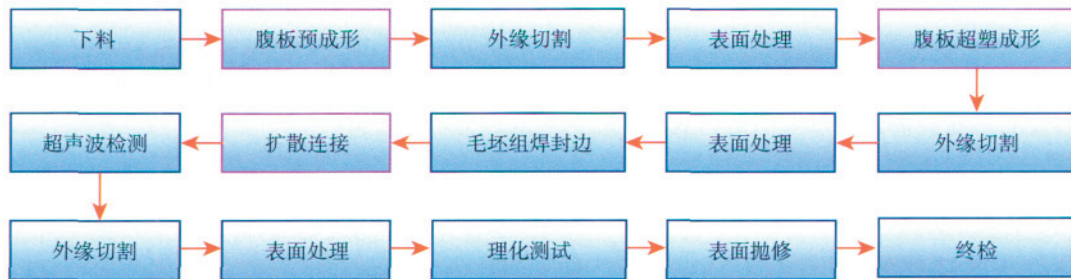


图6 工艺流程方案

Fig.6 Process flowchart

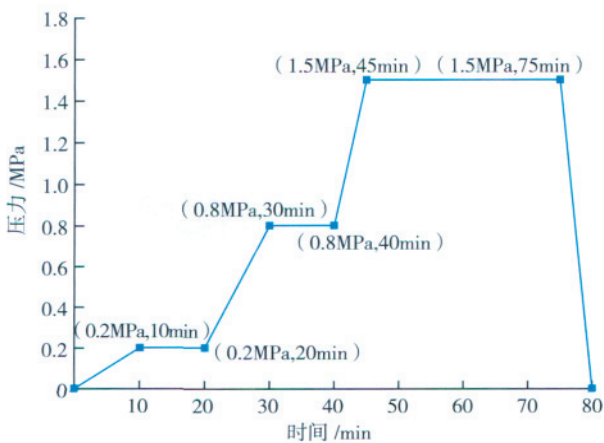


图7 腹板超塑成形加压曲线

Fig.7 Pressure curve of web plate during superplastic forming

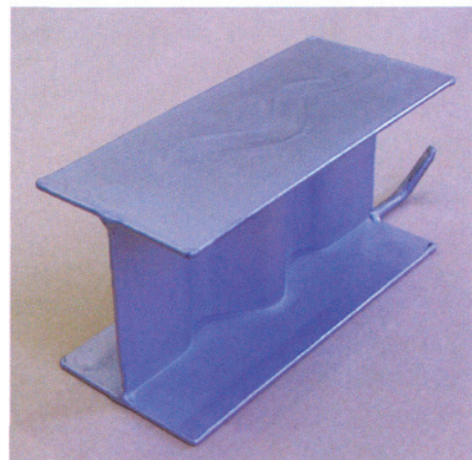


图8 钛合金层合梁模拟件

Fig.8 Simulation sample of titanium alloy laminated beam

层合梁热等静压扩散连接主要工艺参数为: 扩散温度 $880^{\circ}\text{C} \sim 930^{\circ}\text{C}$, 扩散压力 1.2MPa , 保压时间 1h 。

4 试验结果分析

采用 SPF/DB 工艺制造的钛合金层合梁模拟件如图 8 所示。目视检查其成形情况和表面质量, 层合梁的各圆角已经完全贴膜, 缘条上下表面的三角区仅有轻微下陷, 表明在研制过程中所采用的工艺参数和过程合理可行。

利用金相显微镜观察扩散连接区域的微观组织, 腹板与缘条相连接的三角区微观组织如图 9、图 10 所示, 可以看出, 零件超塑成形 / 扩散连接后基体的微观组织为等轴 $\alpha + \beta$ 组织, α 相晶粒度大于 9 级; 三角区处仍存在局部未填充区域, 且三角区填充条与缘条之间已经完全扩散连接, 而与腹板圆弧段的连接状态为点断扩散连接。因为在圆弧段处, 零件在热等静压状态下受到的

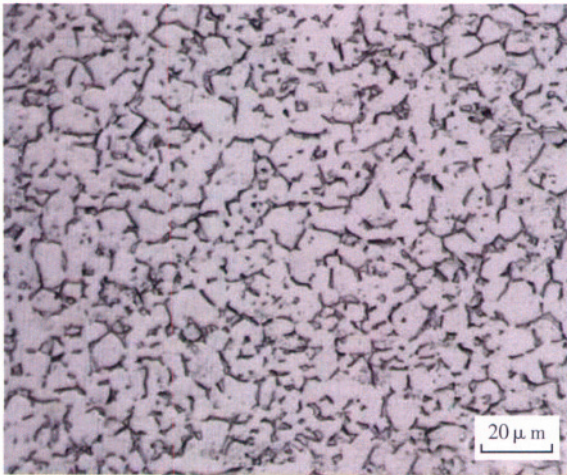


图9 三角区基体微观组织

Fig.9 Microstructure of triangle zone base metal

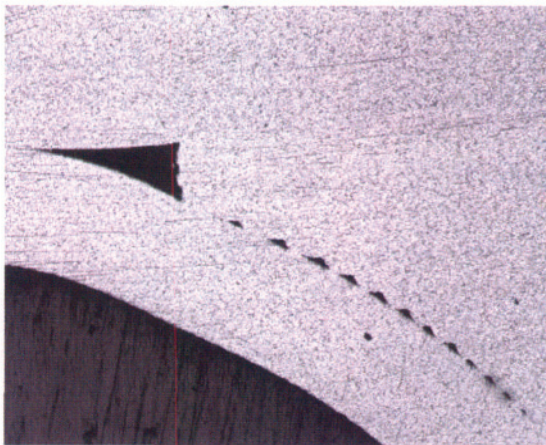


图10 三角区的扩散连接状态

Fig.10 Diffusion bonding status of triangle zone

外界气压存在侧向分力, 使受到的扩散连接压力小于初始设定值, 因此需要改进工艺参数, 提高热等静压扩散连接的气体压力。

为验证层合梁扩散连接的可靠性, 在同种工艺处理后的零件上切取试样对扩散连接界面进行剪切拉伸试验, 剪切试样的搭接宽度为 20mm , 搭接长度 10mm 。层合梁剪切检测结果表明, 编号 A1、A2、A3 的拉伸强度分别为 900MPa 、 1090MPa 、 1020MPa 。剪切拉伸后的断裂位置均在单层板处, 说明扩散连接区能承受的剪力远远大于单层板所能承受的拉力。

在层合梁模拟件研究的基础上, 采用层合结构的超塑成形 / 扩散连接工艺技术, 研制了 1:1 的钛合金机翼工字形波纹腹板层合梁, 见图 11, 其性能基本满足使用要求, 与原锻件相比钛合金原材料利用率可提高 50% , 结构减重 15% 。

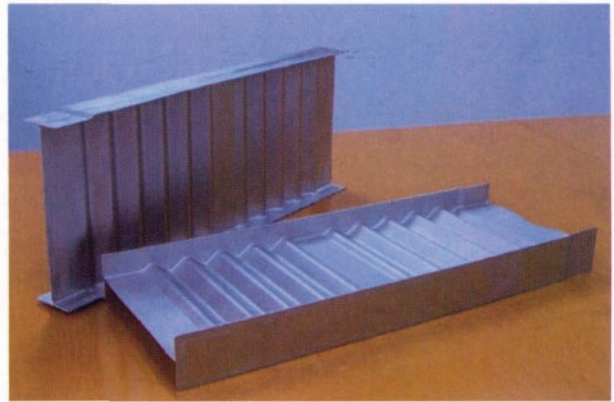


图11 钛合金层合梁样件

Fig.11 Sample of titanium alloy laminated beam

5 结束语

(1) 采用先超塑成形梁腹板, 再热等静压扩散连接梁腹板与缘条, 最终成为整体构件的 SPF/DB 组合工艺方法可以实现钛合金层合结构波纹梁的制造。

(2) SPF/DB 层合梁外形尺寸、微观组织和性能等基本能满足设计使用要求, 但其工艺参数仍有待通过深入研究而进行优化。

参考文献

- [1] 王向明. 飞机钛合金结构设计与应用. 北京: 国防工业出版社, 2010, 11.
- [2] 曹春晓. 选材判据的变化与损伤容限钛合金的发展. 金属学报, 2002, 38:125-128.
- [3] 李志强, 郭和平. 超塑成形 / 扩散连接技术的应用与发展现状. 航空制造技术, 2004, 11:50-52.
- [4] 侯红亮, 王耀奇, 李晓华, 等. 先进钣金成形技术在航空航天领域的应用(上). 金属加工, 2008, 13:22-24. (责编 小城)