

热塑性复合材料超声焊接技术

Ultrasonic Welding of Thermoplastic Composites

中航复合材料有限责任公司 卓鹏



卓鹏

现就职于中航复合材料有限责任公司,北京航空制造工程研究所 101 室 RTM 组。

热塑性复合材料焊接技术

1 背景

焊接技术在传统金属和高分子材料领域已经应用了很长时间,然而热塑性复合材料的焊接技术却是一个新兴的领域。如今多种传统的连接技术得到了进一步的改进,使其适用于复合材料的连接,而焊接技术是众多连接技术的一种。图 1 显示了各种纤维增强与非增强热塑性高分子材料的焊接技术^[1]。

热塑性复合材料由于具有更好的韧性以及具有可回收再造的特点,在许多工业和商业领域已经开始逐渐代替传统的金属材料 and 热固性复合材料。随着热塑性复合材料得到

由于热塑性复合材料被越来越多地应用于航空、风力发电以及各种交通运输等工业领域,具有高效率的热塑性复合材料焊接技术也得越来越受到重视。超声焊接技术是多种焊接热塑性复合材料技术的其中一种。它具有极快的生产效率、极短的周期时间以及容易进行自动化生产和控制的特点。

更广泛的应用,对热塑性复合材料结构连接的研究得到了发展。相比于传统的复合材料胶接工艺,焊接技术是一项非常快速和短周期的连接技术。因此,该技术已应用于波音新一代客机机翼前缘筋与蒙皮的连接。由此可见,热塑性复合材料的焊接技术具有良好的发展前景。

在焊接的过程中,界面上的高分子被加热到熔融的状态;在不同界面上的高分子链随着链段的扩散而混合缠绕;随着温度的降低,熔融的高分子冷却固化,本身的界面消失而成为一个整体^[2]。

2 热塑性复合材料焊接技术类型

根据不同的热产生原理,热塑

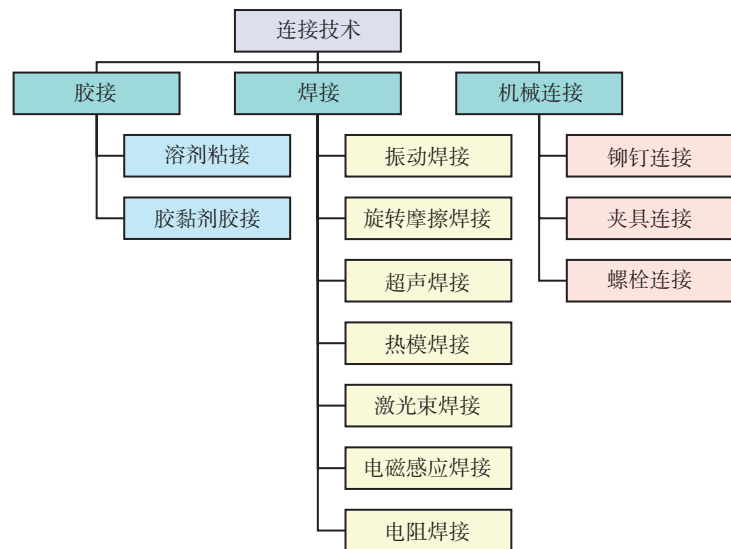


图1 纤维增强与非增强热塑性高分子材料连接技术

性复合材料的焊接技术可分为3大类,热焊接(Thermal Welding)、摩擦焊接(Friction Welding)以及电磁焊接(Electromagnetic Welding),如图2所示^[3]。而在航空领域最常用的3种焊接技术是电磁感应焊接(Induction Welding)、电阻焊接(Resistance Welding)以及超声焊接技术(Ultrasonic Welding)。

电磁感应焊接是利用磁性介质在高频率电磁场升温,从而使热塑性复合材料界面熔化进行连接。电磁感应焊接设备通常含有一个能产生高频电流的感应线圈(Induction coil)。该线圈产生一个200~500kHz的高频电磁场,将作用于一个导电性或铁磁性的介质。在涡流效应的作用下,电阻加热使导电性介质升温;对铁磁性介质,磁畴被电磁场重复地

扰乱,铁磁性介质升温主要由磁滞效应引起。与介质接触的热塑性高分子材料被加热至熔融温度。被连接的熔融部位在保持一定的压力条件下冷却固化,进而连接成为一个整体。图3为利用电磁感应焊接技术连接一个单搭接部件的示意图^[3]。

与电磁感应焊接利用高频电磁场进行加热不同,电阻焊接是利用连接部件之间的电阻元素或介质,如金属网格或碳纤维带。电流通过电阻介质使其升温,当温度达到连接界面热塑性复合材料的熔融温度时,电阻介质周围的热塑性高分子熔化,并在压力的作用下冷却而连接在一起。图4为电阻焊接工艺的示意图^[4]。

超声焊接技术是利用高频率超声振动进行连接的一种技术。被连接部位首先在压力的作用下固定,然后施加高频率的振动,在热塑性材料表面和分子链间的摩擦作用下产生热量。一层被称为能量导向薄膜(Energy Director)的具有凸起或平的高分子薄膜被放置在两个被连接部位之间,有助于热量的产生。当能量

导向薄膜达到熔融温度,它将在压力的作用下流动,浸润被连接部件的表面,同时界面中的高分子链发生扩散和缠绕,从而形成连接。

图5为超声焊接设备的简图^[3],它包括1个电压或磁致伸缩换能器、1个助推器、1个超声振动头和1个基座。电压或磁致伸缩换能器产生高频率超声振动并作用于连接部位,从而使其升温并连接。

3 超声焊接的优缺点

超声焊接技术是一种工业界常用的焊接技术,快速和周期短是其优点。同时,超声焊接具有高效率、容易实现自动化和适用于大批量生产的特点。其最高的产率可达到60件/min,焊接时间要低于其他任何一种焊接技术,并且也不需要特定的循环系统来去除烟雾或降温。超声焊接技术的高效率使其相较于其他连接技术具有更高的产率和更低的成本。先进的超声焊接设备可全面控制和监控焊接的过程,使得焊接工艺很容易实现自动化^[5-6]。

然而,超声焊接也存在其局限性,其中之一就是大型的连续连接无法在一次焊接过程中完成。同时,并不是所有的几何形状都可以进行超声焊接,特殊的连接形状需要进行特殊设计。而在焊接过程中,各种焊接工艺参数如能量等级、焊接压力、焊接时间等会相互影响,工艺较为复杂。工艺参数之间的相互作用也会影响到连接部位的性能。材料的一

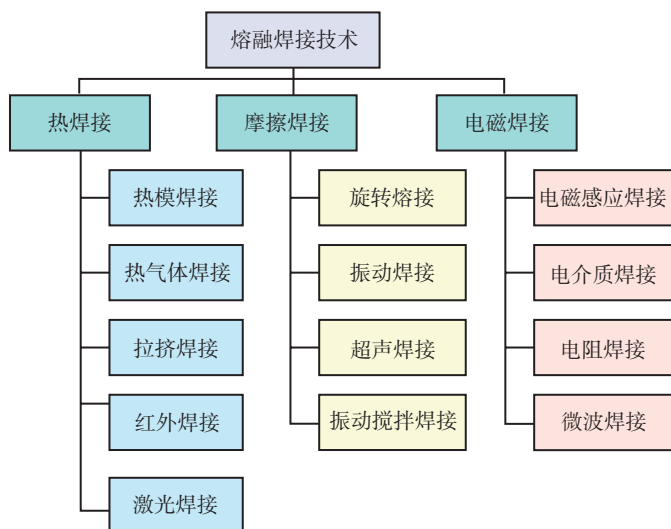


图2 热塑性复合材料焊接技术分类

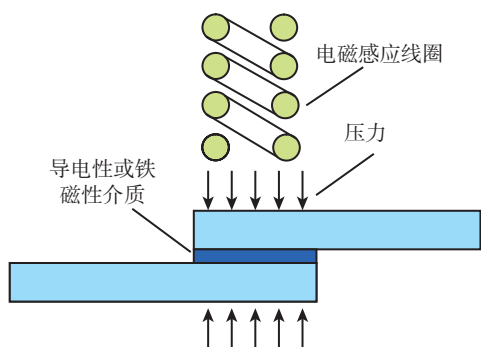


图3 电磁感应焊接技术连接一个单搭接部件的示意图

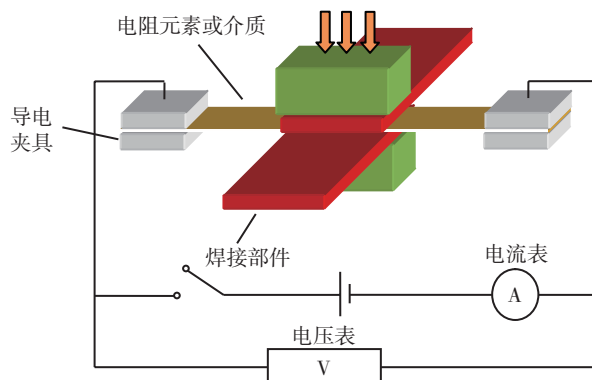


图4 电阻焊接热塑性复合材料示意图

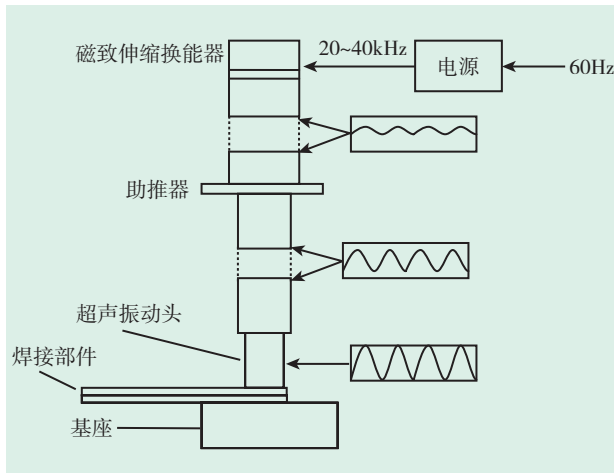


图5 超声焊接设备简图

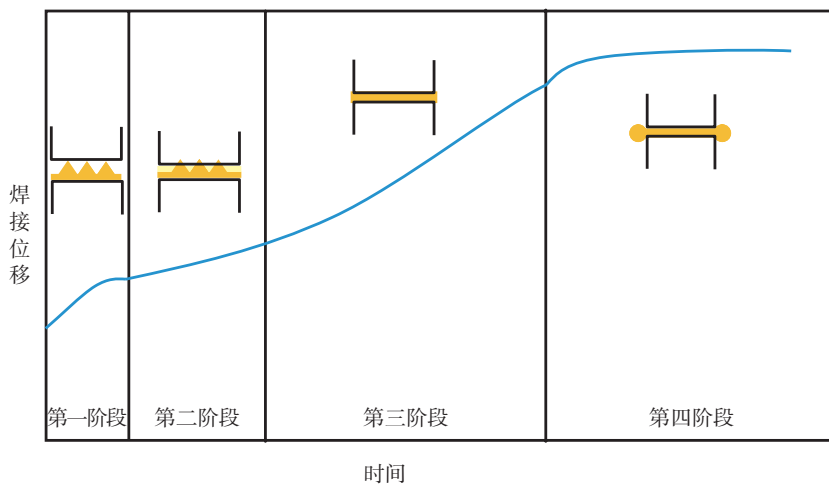


图6 超声焊接热塑性复合材料的4个阶段

些性能,如熔融温度、熔融粘度和分子量等也会对超声焊接产生影响。另外,由于焊接部件的不同,夹具的工具成本也会相对较高^[5-6]。

超声焊接热塑性复合材料的机理

H.Potente 在 1984 年提出了超声焊接热塑性高分子材料的机理。当用超声焊接高分子材料时,纵向的振动由超声焊接头传递到连接部件。一个固定的波场使得两个分开的部件连接在一起。他提出,焊接的部位应放置于最大应力或应变的位置,同时部件的形状对于超声的传递和声能热能的转化起到了决定性的作用^[7]。

Benatar 和 Gutowski^[8]把超声焊

接过程分为 5 个独立但又相互影响的部分:(1)部件的机械振动;(2)热塑性高分子材料的粘弹性升温;(3)热传递;(4)流动和浸润;(5)分子链扩散。

之后的研究把超声焊接热塑性复合材料机理总结为以下 4 个阶段,如图 6 所示^[5]。

(1)在焊接过程中,超声振动垂直于连接部位的表面。放置于连接部件之间的额外的能量导向薄膜在压力的作用下与连接部件的表面接触。此时,热量的产生达到最大值,能量导向薄膜在焊接过程的阶段 1 中熔化并在界面中流动,从而使得两个连接部件之间的距离减小,这个位移迅速增加直到熔化的能量导向薄膜接触并铺满连接表面。此时能量导向薄膜的熔化速率降低。

(2)在第二阶段里,被连接的两个部件表面相接触,熔化速率再次提升。高分子链间摩擦导致连接部件表面熔化,热量从能量导向薄膜传递到热塑性复合材料上。

(3)稳定状态的熔化过程在第

三阶段进行。熔化的能量导向薄膜在被连接的复合材料表面流动并浸润连接表面,形成一个厚度一致的熔化层,进而形成一个完整的连接,同时伴随着一个稳定的温度分布。

(4)高分子链间扩散和缠绕在连接部件的界面间进行。经过一定时间,或达到一定的能量级别或一定的位移量,第四阶段开始。压力仍然保持在连接部件上,从而使多余的熔化高分子从界面中被挤出,分子键形成,最后焊接处冷却,形成一个整体。

影响超声焊接热塑性复合材料工艺和性能的因素

1 基体材料和增强材料的种类

对超声焊接热塑性复合材料,焊接材料的种类对焊接部位的强度有很大的影响,同时高分子基体的组织结构也会对焊接工艺有所影响。非结晶高分子材料中分子链是随机分布的,从而在升温过程中高分子基体逐渐熔化。非结晶高分子材料能较好地转化超声的振动,因此非结晶热塑性复合材料的焊接具有更宽的焊接工艺窗口^[5]。相比之下,一些半结晶热塑性高分子材料对超声波能量的传导性更低。半结晶高分子具有结晶相和无定形相,因此加热时需要更多的能量来熔化结晶的部分有序分子链结构,这样分子链间扩散和分子链流动才能进行^[5]。

增强纤维同样对超焊接工艺和性能有重要的影响。若连接部位有纤维增强,则可提高连接部位的强度。然而若纤维含量过高使得高分子基体不足,则会降低连接部位的强度。具有方向性的纤维比无序的增强纤维具有更好的增强效果。同样,在焊接过程中纤维改变方向也会影响到连接部位的强度。

2 能量导向薄膜的形状和结构

能量导向薄膜的作用是使超声振动产生的热能更好地集中在焊接

部件之间的表面。能量导向薄膜在压力下与焊接部件的表面接触,并在超声振动中被加热、熔化。熔化的能量导向薄膜在焊接部件表面间流动并形成了最终的连接。

能量导向薄膜对超声焊接热塑性复合材料工艺起到很重要的作用。其结构、大小和形状都会影响到焊接部位的最终质量。Liu^[9-10]用短玻璃纤维增强的尼龙6和聚丙烯复合材料对3种不同形状(三角形、半圆形和长方形凸缘)的能量导向薄膜对焊接强度的影响进行了研究,并提出了一种理论模型,预测半圆形凸起的能量导向薄膜会得到更高的连接强度。有关超声焊接连续碳纤维增强聚酰亚胺复合材料的研究对能量导向薄膜凸起的方向和凸起的个数对连接强度的影响进行了探讨。凸起的方向平行于受力方向(图7^[11]中 P_1)所得到的连接强度优于垂直于受力方向。使用多个凸起的能量导向薄膜更有助于其熔化过程中的流动和对连接表面的浸润,从而减少在焊接过程中对表层纤维的扰乱。

3 热塑性复合材料超声焊接工艺

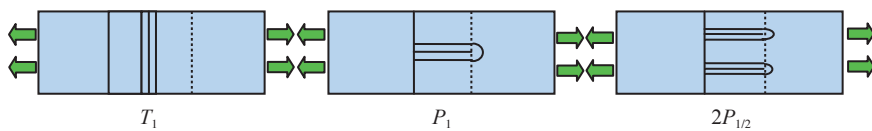


图7 不同方向和结构的能量导向薄膜(俯视图)

参数

影响热塑性复合材料超声焊接的主要参数有超声振幅、焊接时间(产生超声振动的时间)、焊接压力、保压时间(超声振动停止后冷却和固化时间)和固化压力。

(1) 超声振幅。

在超声焊接过程中,平均粘弹性加热速率(Q_{avg})取决于复合损耗模量(E'')、频率(ω)以及所受应变(ϵ_0):

$$Q_{avg} = \omega \frac{\epsilon_0^2 E''}{2}$$

复合损耗模量主要由温度决定,

所以当接近玻璃化转变温度或熔化温度时,损耗模量增加,从而使更多的机械能量转化为热能。升温开始后,焊接界面上的温度迅速上升,可超过 $1000\text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$ ^[12]。提高超声的振幅可提高在焊接中的能量输入。

(2) 焊接时间。

焊接时间为超声波发生器产生振动的时间,延长焊接时间能增加焊接中的能量输入。通常随着焊接时间的增加,焊接强度也会得到提升直到达到最佳的焊接时间。若进一步延长焊接时间会导致焊接连接强度的降低^[13]。

(3) 焊接压力。

焊接压力的作用是在焊接过程中使焊接部位接触,从而将超声振动传递到焊接部位。大部分的超声焊接工艺是保持一个固定的焊接压力。对于某些特定系统,焊接压力可在焊接过程中改变。焊接压力的提高有助于能量的转换和熔融高分子的流动。同时,焊接压力会对焊接时间产生影响。在同样的能量输入情况,提高焊接压力会减少焊接的时间,但过高的焊接压力会导致机体树脂被挤

出界面。因此,选择最佳的焊接压力对超声焊接热塑性复合材料十分重要^[5]。

(4) 固化压力和保压时间。

连接形成过程中,保持一定的固化压力和保压时间有助于确保焊接部件在熔化的能量导向薄膜固化和高分子链扩散的连接形成过程中保持紧密贴合。增长保压时间和固化压力有助于提高连接部位的强度直到达到最大值^[10]。在冷却过程中,焊接中熔化的半结晶高分子树脂会进行重结晶。因此,在固化的过程中

施加压力有助于高分子链在两个连接界面之间进行扩散和缠绕^[13]。

结束语

由于热塑性复合材料被越来越多地应用于航空、风力发电以及各种交通运输等工业领域,具有高效率的热塑性复合材料焊接技术也得越来越受到重视。超声焊接技术是多种焊接热塑性复合材料技术的其中一种。它具有极快的生产效率、极短的周期时间以及容易进行自动化生产和控制的特点。它利用超声振动在被焊接部位产生热能,从而熔化连接部位的界面,在固化后使得两部位连接在一起。超声焊接工艺主要由4个参数控制,分别为超声振幅、焊接时间、焊接压力,以及固化时间和保压时间。由于材料本身对焊接部件的性能具有比较大的影响,同时各工艺参数又会相互影响,因此对特定的热塑性复合材料,其最佳焊接工艺参数还需要进一步研究。

参考文献

- [1] Rudolf R, Mitschang P M, Rueckert C. Welding of high-performance thermoplastic composites. *Polymer and Polymer Composites*, 1999, 7(5): 309-315.
- [2] Stokes V K. Vibration welding of thermoplastics part I: Phenomenology of the welding process. *Polymer Engineering and Science*, 1999, 28(11): 718-727.
- [3] Yousefpour A, Hojjati M, Immarigeon J. Thermoplastic composite materials: fusion bonding. *Welding of Thermoplastic Composites*, 2004, 17(4): 303-341.
- [4] Stavrov D, Bersee H E N. Resistance welding of the thermoplastic composites-an overview. *Composites Part A*, 2005, 36(1): 39-45.
- [5] Troughton M J. Handbook of plastics joining: part I joining processes. U:William Andrew, 2008.

本文共有参考文献13篇,因篇幅有限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 良辰)