http://pmse.scu.edu.cn

先进聚合物基复合材料超声焊接研究进展

王 静，程 健，肖存勇，贾 松，任 荣，熊需海
（沈阳航空航天大学材料科学与工程学院 辽宁省先进聚合物基复合材料制备技术重点实验室，辽宁 沈阳 110136）

摘要：先进聚合物基复合材料（APC）取代传统金属材料实现了航空航天结构件的轻量化，其用量已成为衡量大型飞行器技术先进性的重要标志。高效连接工艺技术是影响APC构件制造成本和使用安全的关键因素之一。文中综述了纤维增强热塑性树脂基复合材料和热固性树脂基复合材料超声焊接的研究进展；详细讨论了超声波焊接机理、焊接头结构设计及焊接工艺参数（焊接时间、焊接压力、振幅、能量导向器类型等）等对APC焊接头承载性能的影响，并总结了目前APC超声焊接领域存在的问题，指出了未来的研究方向。

关键词：纤维增强树脂基复合材料；超声波焊接；能量导向器；焊接参数
中图分类号：V261.3+4 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2023）09-0166-08

结构轻量化是航空航天技术发展永恒的主题[1]。采用具有高比强、高比模以及优异抗疲劳、耐腐蚀性能的先进聚合物基复合材料（APC）取代铝合金等金属材料制造承力结构，如飞机蒙皮、框梁、壁板等结构以及固体火箭发动机壳体、导弹弹体、卫星承力筒等，是实现航空航天器结构轻量化及提高综合效能的关键技术途径[2~4]。大量事实证明，APC用量是衡量大型飞行器技术先进性的重要标志之一[5]。飞机结构采用APC制造减重效果达20%~30%；随着APC技术的不断发展，其在飞机结构中的应用逐渐从襟副翼、方向舵、扰流板和起落架舱门等次承力结构扩展至机身、机翼、尾翼和后承压框等主承力结构，波音787和空客A350大型客机结构中APC用量已经达到了50%以上[6]。

可设计性和整体化成型也是APC结构的突出优势；然而，利用共固化、共胶接技术制造APC加筋壁板等复杂结构件时存在制造过程诱发的缺陷多、尺寸超差严重以及二次胶接结构不可拆卸导致制造容错率低、成品率不高等问题。APC部件装配过程通常采用螺栓连接、铆钉连接等机械连接方式，钻孔是APC机械连接的必须前置条件；钻孔切断了APC中纤维增强体，降低了本体的力学性能；同时，机械连接的接头区域存在极大的应力集中，该效应对具有力学各向异性及层合结构特性APC的影响远甚于金属材料；机械连接组件的增重效应对APC结构轻量化也产生了严重负面影响。据统计，飞机制造过程中机械连接的成本占制造总成本的19%~42%，如果采用APC焊接技术能够节省超过61%的人工成本[4,6,7]。

超声波焊接是利用高频振动波传递到2个相互搭接的待焊接物体表面，使搭接黏合面相互摩擦产生热量，进而使热塑性树脂熔融而形成分子层之间的熔合；该技术具有成本低、效率高、稳定性强、不会损伤非焊接区域、高效无污染、适合批量操作和工艺自动化等优点，被广泛应用在塑胶制品之间、塑胶制品与金属配件之间及其它非塑胶材料之间的黏结[8,9]。近年来，APC超声波焊接技术得到快速发展；本文系统总结了超声焊技术在APC连接方面的研究进展及存在的问题，归纳分析了超声焊原理、焊接头结构设计、焊接工艺参数等对不同类型APC焊接头性能的影响，提出了APC超声焊技术未来的发展趋势以及研究方向，旨在对该领域的研究

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2023.0198
收稿日期：2022-10-24
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51403129）；辽宁省兴辽英才计划（XLYC1907019，XLYC1907198）；辽宁省教育厅面上项目（LJKZ0171）
通讯联系人：王静，主要从事先进树脂基复合材料研究，E-mail: jingwang_1217@126.com

提供新思路。

1　APC焊接技术现状

APC是高性能连续纤维增强复合材料,纤维结构和性能是影响APC力学性能最关键的因素。APC焊接过程主要利用APC表面层的基体树脂的物理化学性能,且必须避免破坏母材中纤维本体和铺层结构;基于该准则,最具使用价值的APC焊接技术主要包括电阻植入焊、电磁感应焊和超声焊。电阻植入焊和电磁感应焊需要在APC母材的搭接区域分别植入电阻加热元件及电磁感应加热元件,利用2种加热元件产生的热量熔化焊接区域的热塑性焊接剂(黏结剂)实现焊接;柔性加热元件能够随着APC结构外形的改变而改变,因此,2种技术均适合于大型复杂APC部件的连接,目前已在空客A320机身龙骨梁、球面框、C型框以及湾流G650尾翼等热塑性APC结构连接制造中获得验证。受加热元件发热效率的限制,APC电阻植入焊和电磁感应焊最佳焊接时间通常都在几十秒至3 min之间,焊接速度较低;APC焊接头中植入电阻加热元件或电磁感应加热元件等异物不仅增加了结构的质量、产生应力集中,而且在潮湿环境中会出现电化学腐蚀现象导致焊接头的稳定性、耐久性下降。超声焊接是利用超声波的高频振动使得APC焊接件搭接表面剧烈摩擦,产生的热量熔化APC表层的热塑性树脂或嵌入的焊接剂薄膜;与电阻植入焊和电磁感应焊相比,超声波焊接不需要植入加热元件等异物;另外,高频振动生热效率高,几秒钟就能够完成APC结构的焊接,极大地提高了焊接效率,适合大规模工业化应用[10]。超声焊在CF/PEI,CF/PEEK等热塑性复合材料结构制造领域取得了成功,甚至在热塑-热固复合材料异质APC结构的连接上也都取得了突破性进展,但是关于超声波焊接技术还是有许多需要解决的技术难题,以及行业标准需要去规范。近些年有许多学者对复合材料超声焊做了大量的研究[11~14],不局限于焊接时间、焊接压力、焊接振幅和频率等参数,包括对能量导向器的研究、能量传递机理、纤维和树脂界面的研究、衡量焊接头强度的标准以及焊接过程的有限元模拟等。

2　APC超声焊接基本原理

超声波焊接的工作原理是在焊接件表面施加高频(通常为20 kHz以上)低振幅的振动,由于焊接件搭接界面处声阻大、横向振动摩擦加剧而产生局部高温,搭接区域树脂熔融,冷却后形成界面黏结层。超声波焊接过程中的振动摩擦包括界面摩擦和黏弹性摩擦2种类型;焊接初期主要发生界面摩擦,升温至树脂玻璃化转变温度后,黏弹性摩擦逐步占据主导地位。当施加超声振动,焊接区域的树脂熔化并在压力的作用下流动,形成厚度适中的黏结层;超声波停止后,在压力作用下保持一定时间,温度降至树脂的熔点或玻璃化转变温度以下形成高强度的焊接结构。常用超声焊接设备的示意图及原理图如Fig.1所示,焊接过程的示意图如Fig.2所示。

焊接过程中的振动可分为5个不同阶段,并得出了焊接功率与所有焊接阶段的关系。Fig.3表示超声波焊接振动过程的5个阶段[11]。第1阶段随着时间的延长,功率持续增加,直到达到最大值。第2

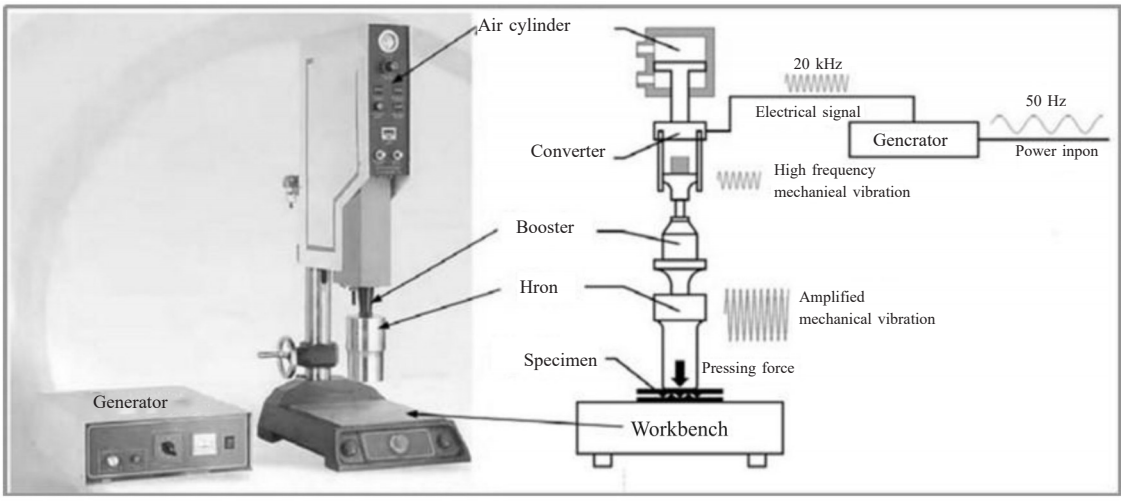


Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic welding equipment

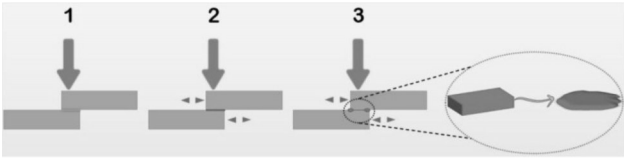


Fig. 2 Schematic diagram of ultrasonic welding process

Tab. 1 Thermoplastic composite ultrasonic welding

Weldment	ED	Time/pressure	LSS
Bamboo fiber/ PLA [13]	NA	1~9 s /0.1~0.5 MPa	3.7 MPa
CF/Elium® [14]	Semicircular ED	0.5~2 s /0.3~0.5 MPa	17.5 MPa
CF/Elium® [15]	NA	NA	NA
CF/PEEK [16]	Flat ED(0.45 mm)	0.7~1.1 s /0.3 MPa	28 MPa
CF/PPS [17]	TED	Displacement mode-1000 N	37.1 MPa
CF/PEI [18]	Flat ED(0.06~0.5 mm)	Displacement mode-1000 N	37.3 MPa

NA: not available; TED: triangular energy director

Tab. 2 Comparison of thermoplastic-thermosetting composite ultrasonic welding

Weldment	ED	Time/pressure	LSS
CF/PEEK-CF/epoxy [19]	Flat PEI film（0.05~0.25 mm)	4 s /2000 N	28.6 MPa
CF/PEEK-CF/epoxy [20]	Flat PEI film（0.25 mm)	0.46~0.83 s /300~1500 N	-
CF/Epoxy-CF/epoxy [21]	PVB film（0.075~0.25 mm)	4 s /1500 N	25 MPa
CF/PEI-CF/epoxy [22]	Flat PEI film（0.06~0.25 mm)	4 s/1500 N	37.7 MPa

阶段开始树脂局部熔化，因此功率降低，但超声波发生器位置保持不变。而第3阶段超声波发生器开始位移，将熔融状态的树脂从界面压出。第4阶段时随着熔融ED的流动，焊接件表面树脂出现局部熔化。在第5阶段，焊接件表层树脂的熔化是主要的，这导致功率降低。Benatar等[12]对三角形能量导向器进行了研究，分析了在焊接过程中这5个阶段的功率变化。

3 热塑性APC超声焊接

Tab.1和Tab.2列出了近年来热塑性-热塑性APC焊接头和热塑性-热固性APC异质焊接头超声焊接的研究工作，具体显示了不同种类的能量导向器（ED）、不同的焊接压力和焊接时间以及不同树脂基体复合材料的单搭接剪切强度（LSS）。研究发现其他条件相同在有能量导向器（ED）的焊接强度要比没有ED高出50%以上；压力对于焊机强度的敏感程度不高，但总体还是呈现焊接强度随着焊接压力的增加先变大后变小，受到实验设备条件的限制，不同的研究者给出的具体的压力值并不相同，趋势明朗但具体数值还有待确定。由于热塑-热固复合材料的超声焊接本质是在热固性复合材料层合板表层添加热塑层，所以焊接工艺以及焊接强度同热塑性复合材料的超声焊接区别并不大，但关于热塑-热固层的相关理论研究目前还比较匮乏，这也是一个热门的研究方向。

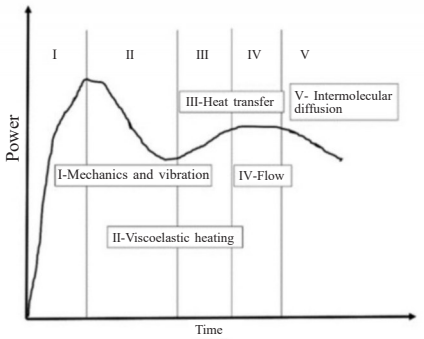


Fig. 3 Power curve of five stages of ultrasonic welding [12]

热塑性APC的基体树脂具有反复加热软化、冷却固结的特性，在反复受热过程中分子结构基本上

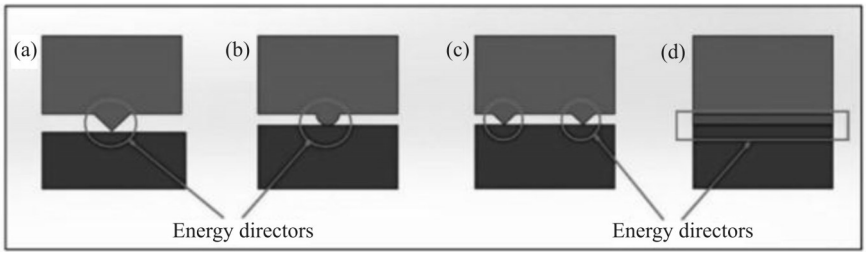


Fig. 4 Schematic diagram of energy guide[34]

不发生变化,超声焊接十分适合热塑性树脂的连接。塑料导热性差,不能立刻散发,能量聚集在焊区,致使两界面处能迅速熔化,施加一定压力后,使其充分接触,两界面的分子间相互扩散缠结,最后形成一个坚固的分子链,达到焊接的目的。Chuah[23],Villegas[24],Goto[25]等对不同类型热塑性树脂的焊接特性进行了研究,系统探究了不同焊接参数(如焊接时间、焊接压力、振幅、保压时间以及能量导向器)对焊接质量的影响。

3.1　焊接工艺参数

焊接参数是影响超声焊接质量的重要因素,主要包括焊接振幅、焊接功率、焊接能量、焊接时间和焊接过程中的垂直位移,整个焊接过程中施加的压力以及保压时间等[26]。Harras等[27]的研究结果表明,最佳接头强度与焊接过程中总能量输入参数的关系比焊接时间的关系更大。Wang等[28]通过试验证明了焊接能量是获得高质量焊接强度的主要参数之一。还有学者研究了以纤维增强尼龙复合材料为载体,通过改变不同的能量输入对焊接过程进行研究,结果表明,随着焊接能量的增加(200~1000 J),焊接效率逐渐提高,但随着焊接能量的进一步增加,由于界面处引入了气孔,焊接强度开始降低。焊接压力和焊接振幅对界面热量积聚有着决定性的作用,界面热量积聚的速率与焊接压力和焊接时间成正比[29]。

焊接频率对焊接效果起着十分重要的作用[30]。Tsujino等[31]对热塑性复合材料进行了研究,结果表明随着振动频率的增加,接头强度在高频(67~180 kHz)处更高,这极大地增加了界面处的温度,但接头强度在低频(27~40 kHz)时明显降低。

在超声焊的过程中除了焊接压力和焊接时间,焊接振幅对焊接过程的影响也是不可忽略的,但由超声波引起的黏弹性加热、机械振动、摩擦等现象的物理机制仍有待充分研究和建模,尤其是超声波发生器和试件之间的高频振动而导致的周期性摩擦过程中能量的传递情况尚不明朗,学者们对振幅的研究相对较少。Palardy[32]等提出了一种原始的实验和建模方法用来更好地理解这个过程。研究结果表明,通过靠近超声波发生器的激光测量,可以很好地估计传输到试件上端的振动能量。焊接过程中,由于界面温度的增加,表面摩擦频率降低,这直接影响到热量的进一步积聚。Liu等[33]研究了改变焊接参数(时间、压力、振幅和ED类型)对GF/PP复合材料焊接质量的影响,研究结果表明焊接时间、振动幅度和EDs类型相比,焊接压力的影响最小。

3.2　能量导向器

能量导向器(ED)是APC超声焊接中的一个重要物理参数。能量导向器是一种人造树脂突起,焊接时将其放置在界面,如Fig.4所示。由于ED的横截面较小,所以对超声波焊接在界面产生的黏弹性摩擦起到十分明显的促进作用,即它有助于通过将能量集中在界面的方式来增加试样本身的黏弹性加热[34]。ED的设计对获得良好的焊接效果起着非常重要的作用,因为其形状、尺寸、形貌和结构对最终焊接质量有着重要影响[35,36]。不同形状的ED对与焊接过程中能量的引导起着至关重要的作用,但其作用机理目前尚不明朗,还需进一步的研究。但是,由于纯聚合物和纤维增强复合材料的刚度不同,因此也可以简单使用平面形状的能量导向器。热塑性复合材料的超声波焊接也可以在特定工艺条件下不使用能量导向器来实现。

Chuah等[23]以ABS塑料和PE塑料为载体,详细研究了半圆形、三角形和矩形等不同形状的ED对超声波焊接效果的影响,研究表明半圆几何形状的ED焊接效果最佳,而三角形ED的焊接效果最差。Villegas等[24]也进行了类似的研究,并测试了不同的结构、方向和形状的能量导向器对焊接质量的影响情况。Goto等[25]研究了在不同的焊接能量下,使用片状ED(0.3 mm厚度的薄膜)和无ED的CF/PA6复

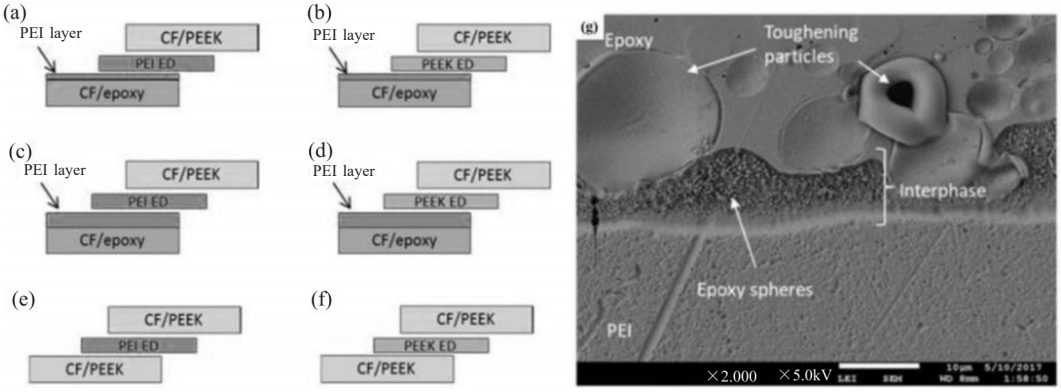


Fig. 5 (a~f) structural diagram of welded specimen; (g) SEM image of interface morphology between epoxy and PEI [40]

合材料的剪切强度和抗拉强度；结果表明，ED对热塑性APC焊接强度以及焊接时间的影响较大。Villegas等[22]研究了片状能量导向器对焊接质量的影响。Senders等[37]以CF/PPS复合材料为焊接母材对片状ED的效果进行了类似的研究，并对不同的材料系统使用了位移控制模式。研究了3种不同的焊接条件，包括搭接焊接、点焊和连续焊接。Palardy等[38]则使用CF/PEI复合材料通过位移控制模式也对片状能量导向器进行了研究。Villegas等[39]研究发现与三角形的ED相比，片状ED对焊接头强度并没有负面影响。根据Zhang等[30]的研究表明，三角形ED更适用于纯聚丙烯（PP）和玻璃纤维增强聚丙烯复合材料，但对于纤维含量较高的树脂基复合材料来说，使用半圆形ED可以获得更好的焊接质量。

4 热固性APC超声焊接

目前在航空航天领域应用最多的热固性树脂基体是环氧树脂（Epoxy）和双马树脂（BMI），但是由于固化反应不可逆性，固化后的树脂再次加热不会流动或软化，当温度过高时会分解[30]。因此，加工成型以后的热固性复合材料并不能直接用于焊接，所以如何将超声焊接技术应用在热固性复合材料上，是目前复合材料焊接领域研究的热点问题。Palardy等[32]对在热固性复合材料表层添加热塑性薄膜的共固化方法申请了专利，该方法能够将热塑性复合材料连接到热固性复合材料上。为了完成热固性复合材料的焊接，Tsiangou等[40]对热固性复合材料进行了表面塑化改性，即在热固性复合材料层合板表面加一层热塑层。在热固性复合材料的超声焊接中应用最多的是热塑性薄膜共固化的方法，如Fig.5所示。

5 总结与展望

随着复合材料在航空航天等领域中的应用逐渐扩大，发展新型、快速的大型复杂结构连接技术势在必行。超声焊接由于其绿色无污染、焊接速度快、稳定性强特点是目前最有应用前景的焊接方式。通过对已发表的研究工作总结希望未来能够在该领域解决以下问题：

(1) LSS强度是目前评估接头可靠的最主要的方式。但是层间剪切强度对于焊缝的评估意义并未得到充分的讨论，只是作为参考。并且对于接头压缩、扭转、疲劳等破坏特性并没有统一的度量标准。因此，在后续的研究中，希望可以提出更多评估焊缝质量测量的方法，并进一步完善树脂基复合材料超声波焊接质量的检测手段，尤其是完善实时跟踪监测方法；

(2)虽然有部分学者使用有限元模拟的方法对焊接过程进行预测，但这更多是从力学角度出发而进行的模拟，对于此过程中的物理过程（熔融程度、树脂共固化、纤维的位移等）以及化学反应（树脂固化等），尚未达完整的理论体系。因此，如何使用有限元的方法将焊接过程清晰地反映出来是当下研究的难点与重点，对获取有效实验数据具有重要的指导意义；

(3)能量导向器（ED）对与树脂基复合材料的超声焊接至关重要，目前对于ED的研究已经取得了一定的进展，不同厚度的ED对于焊接头强度的影响已经基本清晰，但需要注意的是ED的制备仍是一道不小的难题，尽管ED机理以及作用方式较为明朗，但是对于ED的制备还没有统一的工艺标准，所以此类研究还需要加强，即如何快速地制备出高精度的ED将会是提高焊接强度的关键；

(4)焊接过程的智能监测也是一个有意义的研

究方向,现阶段只能做到监测焊接界面的温度、应力应变、位移等信息,但是对于树脂的流动、熔融、凝固等现象还不能完全监测到,因此目前技术水平并不先进,如果能够研制出更多高精确度的传感器,将会对焊接过程的认知更加清晰,更利于提高焊接强度。

参考文献:

[1] Yao S S,Jin F L, Rhee K Y, *et al*. Recent advances in carbon-fiber-reinforced thermoplastic composites: a review[J]. Composites Part B:Engineering, 2018, 142: 241-250.

[2] Red C. The outlook for thermoplastics in aerospace composites, 2014-2023[J]. High-Performance Composites, 2014, 22: 54-55.

[3] Kadiyala K A, Bijwe J. Investigations on performance and failure mechanisms of high temperature thermoplastic polymers as adhesives[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2016, 70:90-101.

[4] Villegas I F, Moser L, Yousefpour A, *et al.* Process and performance evaluation of ultrasonic, induction and resistance welding of advanced thermoplastic composites[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2013, 26: 1007-1024.

[5] 王雪明, 谢富原. 碳纤维/双马树脂复合材料整体成型过程分层扩展行为实验研究[J]. 航空学报, 2021, 42(2): 410-418.
Wang X M, Xie F Y. Experimental study on behavior of delamination propagation of carbon fiber/bismaleimide composites during integral forming process[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(2): 410-418.

[6] 杜善义.我国大型客机先进复合材料技术应对策略思考[J]. 复合材料学报, 2008,25(1): 1-10.
Du S Y. Strategic considerations for development of advanced composite technology for large commercial aircraft in China[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(1): 1-10.

[7] 杜永, 马玉娥. 湿热环境下纤维增强树脂基复合材料疲劳性能研究进展[J]. 复合材料学报, 2022, 39(2):431-445.
Du Y, Ma Y E. Fatigue performance of fiber reinforced polymer composites under hygrothermal environment – a review[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(2):431-445.

[8] Wedgewood A R, Hardy P E. Induction welding of thermoset composite adherends using thermoplastic interlayers and susceptors[C]. Seattle, WA: Proceedings of the 28th International Technical Conference Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 1996: 850-861.

[9] Balle F, Wagner G, Eiflfler D. Ultrasonic metal welding of aluminium sheets to carbon fibre reinforced thermoplastic composites[J]. Advanced Engineering Materials, 2009, 11: 35-39.

[10] Köhler F, Villegas I, Dransfeld C, *et al*. Static ultrasonic welding of carbon fibre unidirectional thermoplastic materials and the influence of heat generation and heat transfer[J]. Journal of Composite Materials, 2021, 55: 2087-2102.

[11] Villegas I F. Strength development versus process data in ultrasonic welding of thermoplastic composites with flat energy directors and its application to the definition of optimum processing parameters[J]. Composites Part A, 2014, 65: 27-37.

[12] Avraham Benatar, Timothy G, Gutowski. Ultrasonic welding of PEEK graphite APC- 2 composites[J]. Polymer Engineering & Science, 1989, 29: 1705-1721.

[13] Mridusmita R C, Kishore D. Analysis of tensile failure load of single-lap green composite specimen welded by high-frequency ultrasonic vibration[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 28: 739-744.

[14] Bhudolia S K, Gohel G, Leong K F, *et al*. Investigation on ultrasonic welding attributes of novel carbon/Elium® composites [J]. Materials, 2020, 13: 1117-1127.

[15] Bhudolia S K, Gohel G, Fai L K, *et al*. Fatigue response of ultrasonically welded carbon/Elium® thermoplastic composites [J]. Materials Letters, 2020, 264: 127362-127362.

[16] Tao W, Su X, Wang H, *et al*. Influence mechanism of welding time and energy director to the thermoplastic composite joints by ultrasonic welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 37: 196-202.

[17] Villegas I F, Palardy G. Ultrasonic welding of CF/PPS composites with integrated triangular energy directors: melting, flow and weld strength development[J]. Composite Interfaces, 2017, 24: 515-528.

[18] Palardy G, Villegas I F. On the effect of flat energy directors thickness on heat generation during ultrasonic welding of thermoplastic composites[J].Composite Interfaces, 2017, 24: 203-

214.

[19] Villegas I F, Moorleghem R V. Ultrasonic welding of carbon/epoxy and carbon/PEEK composites through a PEI thermoplastic coupling layer[J]. Composites Part A, 2018, 109: 75-83.

[20] Villegas I F, Rubio P V. On avoiding thermal degradation during welding of high- performance thermoplastic composites to thermoset composites[J]. Composites Part A, 2015, 77: 172-180.

[21] Lionetto F, Morillas M N, Pappad S, *et al*. Hybrid welding of carbon- fiber reinforced epoxy based composites[J]. Composites Part A, 2018, 104: 32-40.

[22] Tsiangou E, de Freitas S T, Villegas I F, *et al*. Investigation on energy director- less ultrasonic welding of polyetherimide (PEI)-to epoxy- based composites[J]. Composites Part B:Engineering, 2019, 173: 107014.

[23] Chuah Y K, Chien L H, Chang B C, *et al*. Effects of the shape of the energy director on far- field ultrasonic welding of thermoplastics[J]. Polymer Engineering & Science, 2000, 40: 157-167.

[24] Villegas I F, Bersee H E N. Ultrasonic welding of advanced thermoplastic composites: an investigation on energy - directing surfaces[J]. Advances in Polymer Technology, 2010, 29: 112-121.

[25] Goto K, Imai K, Arai M, *et al*. Shear and tensile joint strengths of carbon fiber- reinforced thermoplastics using ultrasonic welding [J]. Composites Part A, 2019, 116: 126-137.

[26] Ochôa P, Villegas I F, Groves R M, *et al*. Experimental assessment of the influence of welding process parameters on lamb wave transmission across ultrasonically welded thermoplastic composite joints[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 99: 197-218.

[27] Harras B, Cole K C, Vu-Khanh T. Optimization of the ultrasonic welding of PEEK- carbon composites[J]. Journal of Reinforced Plastics & Composites, 1996, 15: 174-182.

[28] Wang K, Shriver D, Li Y, *et al*. Characterization of weld attributes in ultrasonic welding of short carbon fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 29: 124-132.

[29] Tolunay M N, Dawson P R, Wang K K. Heating and bonding mechanisms in ultrasonic welding of thermoplastics[J]. Polymer Engineering & Science, 1983, 23: 726-733.

[30] Zhang D W, Zhang Q,Fang X G, *et al*. Review on joining process of carbon fiber- reinforced polymer and metal: methods and joining process[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47: 3686-3696.

[31] Tsujino J, Hongoh M, Yoshikuni M, *et al*. Frequency characteristics of ultrasonic plastic welding[J]. JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, 2006, 49: 634-641.

[32] Palardy G, Shi H J,Levy A, *et al*. A study on amplitude transmission in ultrasonic welding of thermoplastic composites [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 113: 339-349.

[33] Liu S J, Chang I T. Factors affecting the joint strength of ultrasonically welded polypropylene composites[J]. Polymer Composites, 2001, 22: 132-141.

[34] Bhudolia S K, Gohel G, Leong K F, *et al*. Advances in ultrasonic welding of thermoplastic composites: a review[J]. Materials, 2020, 13: 1284.

[35] Jongbloed B, Teuwen J, Benedictus R, *et al*. On differences and similarities between static and continuous ultrasonic welding of thermoplastic composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 203: 108466.

[36] Villegas I F, Moser L, Yousefpour A, *et al*. Process and performance evaluation of ultrasonic, induction and resistance welding of advanced thermoplastic composites[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2013, 26: 1007-1024.

[37] Senders Frank, van Beurden M, Palardy G, *et al*. Zero- flow: a novel approach to continuous ultrasonic welding of CF/PPS thermoplastic composite plates[J]. Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science, 2016, 2: 83-92.

[38] Palardy G, Villegas I F. On the effect of flat energy directors thickness on heat generation during ultrasonic welding of thermoplastic composites[J].Composite Interfaces, 2017, 24: 203-214.

[39] Villegas I F, Valle Grande B, Bersee H E N, *et al*. A comparative evaluation between flat and traditional energy directors for

ultrasonic welding of CF/PPS thermoplastic composites[J]. Composite Interfaces, 2015, 22: 717-729.

[40] Tsiangou E, de Freitas S T, Villegas I F, *et al*. Ultrasonic welding of epoxy- to polyetheretherketone- based composites: investigation on the material of the energy director and the thickness of the coupling layer[J]. Journal of Composite Materials, 2020, 54: 3081-3098.

Progress of Ultrasonic Welding of Advanced Polymer Matrix Composites

Jing Wang, Jian Cheng, Cunyong Xiao, Song Jia, Rong Ren, Xuhai Xiong

(*School of Materials Science and Engineering & Liaoning Key Laboratory of Advanced Polymer Matrix Composites, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China*)

ABSTRACT: The advanced polymer matrix composites (APC) have replaced the traditional metal materials to realize lightweight of aerospace structural parts. Their usage has become an important symbol to measure the advanced technology of large aircraft. High efficiency connection technology is one of the key factors affecting the manufacturing cost and use safety of APC components. The research progress of ultrasonic welding of fiber reinforced thermoplastic resin matrix composites and thermosetting resin matrix composites was reviewed in this paper; the effects of ultrasonic welding mechanism, welding joint structure design and welding process parameters (welding time, welding pressure, amplitude, energy guide (ED) type, etc.) on the bearing performance of APC welding joints were discussed in detail. The existing problems in the field of APC ultrasonic welding were summarized, and the future research directions were pointed out.

Keywords: fiber reinforced resin matrix composites; ultrasonic welding; energy guide; welding parameters