

引用格式:张照龙,王天政,周海鹏,等.碳纤维增强热塑性复合材料的超声波连续焊研究现状[J].材料工程,2025,53(11):1-10.
ZHANG Zhaolong, WANG Tianzheng, ZHOU Haipeng, et al. Research status of ultrasonic continuous welding of carbon fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(11): 1-10.

碳纤维增强热塑性复合材料的 超声波连续焊研究现状

Research status of ultrasonic continuous
welding of carbon fiber reinforced
thermoplastic composites

张照龙,王天政,周海鹏,敖三三,李 洋*
(天津大学 材料科学与工程学院,天津 300354)
ZHANG Zhaolong, WANG Tianzheng,
ZHOU Haipeng, AO Sansan, LI Yang*
(School of Materials Science and Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300354, China)

摘要:碳纤维增强热塑性复合材料(CFRTP)具有优越的综合力学性能,以及可快速成形、可焊接、可回收等特点,在航空航天、车辆制造等领域的应用逐渐增加。超声波焊接被认为是最适合焊接 CFRTP 的方法之一。随着 CFRTP 在航空航天主承力结构中的应用的增加,传统的超声波点焊所形成的离散式焊点难以满足主承力结构对焊接接头强度的要求。为此,国外学者提出了超声波连续焊技术,从而实现 CFRTP 结构的缝焊连接,我国在此领域尚未见文献报道。本文从 CFRTP 超声波连续焊装备、接头设计、工艺特点和质量检测四个方面梳理 CFRTP 超声波连续焊研究成果,讨论 CFRTP 超声波连续焊中有待解决的科学问题和技术瓶颈,为我国开发 CFRTP 超声波连续焊技术提供参考。

关键词:碳纤维增强热塑性复合材料;超声波连续焊;接头设计;工艺特点;质量检测

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2024.000449

中图分类号: TG453;TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2025)11-0001-10

Abstract: Carbon fiber reinforced thermoplastic composites (CFRTP) have superior comprehensive mechanical property, as well as rapid prototyping, weldability and recyclability. The application of CFRTP are gradually increasing in aerospace, vehicle manufacturing and other fields. Ultrasonic welding is recognized as one of the most suitable methods for CFRTP. With the increase of the application of CFRTP in aerospace main load-bearing structures, the discrete solder joints in the form of traditional ultrasonic spot welding are difficult to meet the requirement of the strength of them. Accordingly, foreign scholars have proposed ultrasonic continuous welding technology to realize the seam welding connection of CFRTP structures, which has not been reported in domestic literature. In this paper, the research results of CFRTP ultrasonic continuous welding are reviewed from four aspects: CFRTP ultrasonic continuous welding equipment, joint design, process characteristics and quality inspection. The scientific problems and technical bottlenecks to be solved in CFRTP ultrasonic continuous welding are discussed, so as to provide a reference for the development of CFRTP ultrasonic continuous welding technology of our country.

Key words: carbon fiber reinforced thermoplastic composites; ultrasonic continuous welding; joint design; process characteristics; quality inspection

碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)具有高比强度、高比模量、可设计以及抗疲劳等优异特性,成为继铝合金、高强钢之后的新一代轻量化材料,其用量已

成为评价航空航天器先进性的重要标志^[1-2]。传统的 CFRP 多以热固性树脂作为基体,即碳纤维增强热固性复合材料(CFRTS)。然而 CFRTS 存在成型时间

长,成型固化前需要低温保存,成型固化后基体韧性低、断裂性能差,难以回收利用等问题^[3-5]。而以热塑性树脂为基体的碳纤维增强热塑性复合材料(CFRTP)具有更高的断裂韧性和损伤容限,无需低温储存,无需高温固化(非热压罐成型),还具有可快速成型、可焊接、易修复、可回收的特点^[4-9],可实现CFRP结构件的低成本、高效率制造,有望成为新一代航空航天结构材料。

但与CFRTS相比,CFRTP的热塑性基体具有更高的黏度,从而限制了其构件的成型加工尺寸^[9]。因此,有效的连接技术就成为了CFRTP大规模工业应用的关键技术之一。CFRP结构件常用的连接技术包

括铆接和胶接,其中铆接的钻孔过程会破坏纤维增强体、接头局部产生应力集中、大量铆钉的引入增加结构的质量,铆钉与碳纤维接触的地方还可能发生电化学腐蚀^[5-6,10]。而尽管胶接可避免上述问题,但其形成的胶接接头不可拆卸^[5]、需要较长的固化时间^[6]、连接性能易受环境影响^[9]、还需要额外的表面处理工艺^[11]。由于CFRTP具有可焊性,焊接技术相对于铆接和胶接具有更高的效率、更低的成本,焊接接头还具有反复拆解-焊接的优点,因此在CFRTP的连接方面,焊接技术具有更明显的优越性。近年来,国外在CFRTP焊接技术的研究与开发方面已取得了一定的进展,如图1^[12-17]所示。

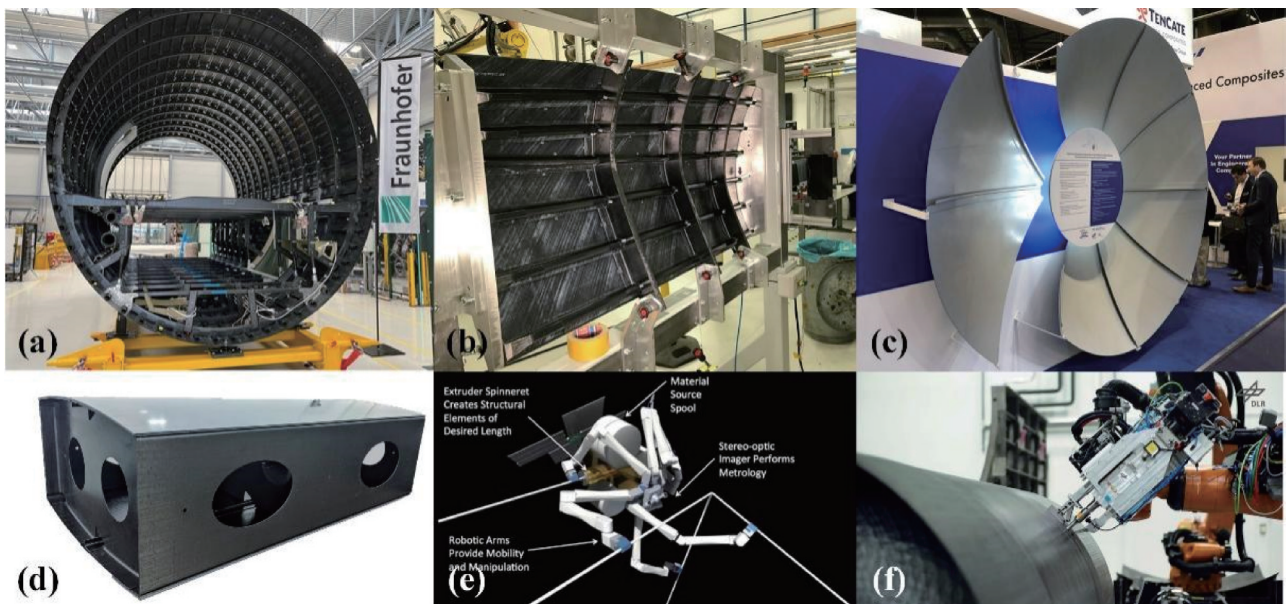


图1 国外CFRTP焊接技术的研发与应用

(a)欧盟采用焊接技术实现世界最大CFRTP机身筒段的装配^[12]; (b)GKN Fokker公司采用焊接技术实现桁架与机身面板的连接^[13]; (c)德国使用焊接技术实现空客A320的CFRTP压力舱壁的装配^[14]; (d)美国卡邦航空公司采用焊接技术制造翼盒^[15]; (e)美国NASA提出采用焊接实现CFRTP空间桁架的在轨制造^[16]; (f)德国宇航中心采用焊接技术实现火箭燃料储箱箱体与端部的连接^[17]

Fig.1 R&D and application of CFRTP welding technology in foreign countries

(a)EU used welding technology to realize the assembly of the world's largest CFRTP fuselage demonstrator^[12]; (b)GKN Fokker used welding technology to connect the truss to fuselage panels^[13]; (c)Germany used welding technology to assemble the CFRTP pressure bulkhead of Airbus A320^[14]; (d)Qarbon Aerospace used welding technology to manufacture wing box^[15]; (e)NASA proposed use of welding to realize the on-orbit fabrication of CFRTP space trusses^[16]; (f)DLR used welding technology to connect the rocket fuel tank to the ends^[17]

CFRTP的主流焊接技术包括电阻焊、感应焊、激光焊及超声波焊。其中超声波焊具有高效、清洁、成本低、操作灵活、易于实现自动化等特点^[3,18],被认为是最适合焊接热塑性材料的方法^[10]。诸多学者对CFRTP超声波焊进行了综述^[9-23]。从这些综述中可知国内外学者在CFRTP超声波焊方面的研究主要集中在焊接接头设计、接头性能的影响因素、焊接质量检测、焊接过程模拟、CFRTP与其他材料的异种超声波焊以及热固性复材的超声波焊。这些研究几乎都是在超声波点焊的条

件下开展的。随着CFRTP在航空航天主承力结构中应用的增加,点焊形成的离散式焊点难以满足主承力结构对焊接接头强度的要求。为此,国外学者提出了CFRTP超声波连续焊技术,通过行走机构带动超声波焊头的连续运动,从而实现CFRTP结构的缝焊连接。超声波连续焊是CFRTP构件焊接的最新发展之一,也被认为是实现大尺寸CFRTP构件装配连接的关键技术之一,对其开展的研究还非常有限,目前仅有荷兰和德国部分学者对CFRTP超声波连续焊开展研究。本文对

国外CFRTP超声波连续焊研究现状进行总结,旨在为我国开发相关技术提供有益参考。

1 CFRTP 超声波连续焊设备

荷兰代尔夫特理工大学先后搭建了如图 2 所示的

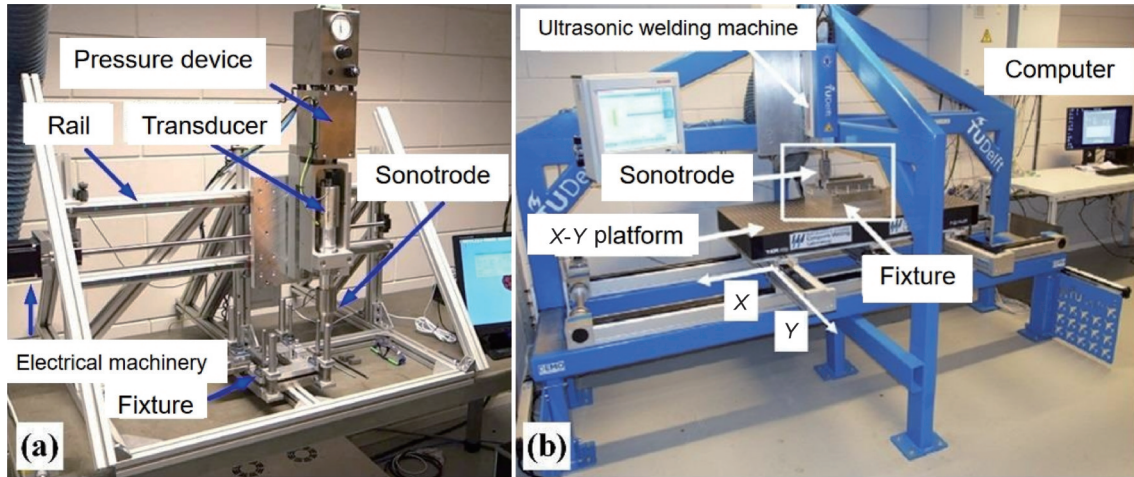


图 2 代尔夫特理工大学 CFRTP 超声波连续焊样机

(a)第一代^[24]; (b)第二代^[25]

Fig.2 Prototype of CFRTP ultrasonic continuous welding machines at Delft University of Technology

(a) the first generation^[24]; (b) the second generation^[25]

德国航空航天中心(DLR)面向航空航天全尺寸 CFRTP 零部件开发了超声波连续焊机器人,如图 3 所示^[26]。该装备是在欧盟“清洁天空”(Clean Sky)计划“多功能机身演示器”(MFFD)项目支持下开发的,旨在为未来热塑性航空航天零部件的装配制造提供新的

解决方案^[27]。该机器人主要由 Kuka 机器人机身、Branson 超声波系统和末端执行器组成。末端执行器又包括一个压紧装置、一个焊头以及一个固结装置,固结装置的作用会在后文介绍。机器人还配备了相关传感器,用于监测机器臂的运动、焊接压力以及焊头位移。

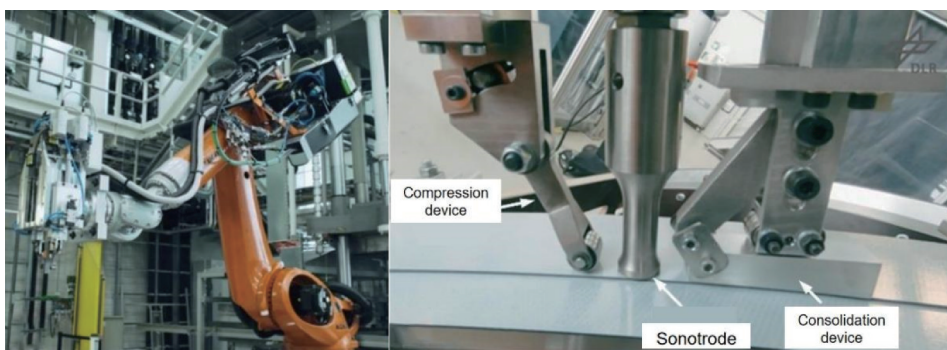


图 3 德国航空航天中心开发的超声波连续焊机器人^[26]

Fig.3 Ultrasonic continuous welding robot developed by DLR^[26]

2 CFRTP 超声波连续焊的接头设计

传统上进行热塑性材料超声波点焊时,需要在待焊工件表面加工导能筋(energy director, ED)。导能筋通常是具有特定形状(如三角形、矩形、半圆形)横截面的微小凸起结构,如图 4(a)所示。然而

这种形式的导能筋并不适合超声波连续焊接。因为这需要在已成型的 CFRTP 结构上进行后加工,如通过共胶接、二次注射等方式将导能筋连接到 CFRTP 结构件表面,这会显著增加生产成本,降低生产效率^[28]。为此,荷兰代尔夫特理工大学的 Villegas 教授先后提出了平导能筋^[28]和网状导能筋^[29],如图 4

(b), (c)所示。平导能筋是一层纯树脂薄膜,网状导能筋是由树脂丝材编织而成的网格结构。焊接前只需将树脂薄膜或树脂丝网放置在待焊两工件之

间,然后进行焊接。这样就避免了对已成型CFRTP结构件进行二次加工,简化了超声波连续焊接过程。

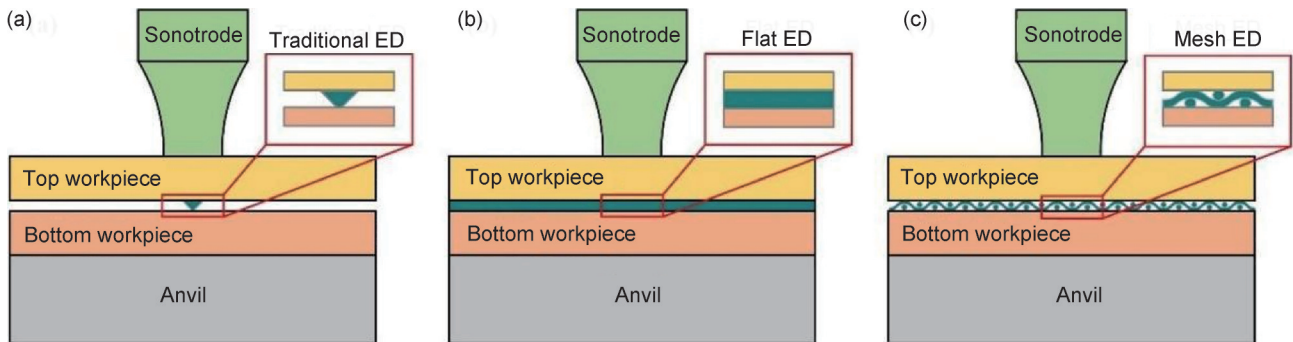


图4 导能筋形式示意图

(a)传统导能筋^[28]; (b)平导能筋^[28]; (c)网状导能筋^[29]

Fig.4 Schematic diagram of form of ED

(a)traditional ED; (b)flat ED; (c)mesh ED

Villegas 教授团队采用平导能筋进行了CFRTP超声波连续焊的研究。他们指出在超声波连续焊时,焊头前方未熔化的平导能筋会阻碍焊头下方已熔化的导能筋的流动,从而对接头产生不利影响^[30]。为此,他们提出了一种称之为“零流动”(zero-flow)的超声波连续焊方法,即采用超薄的平导能筋(0.08 mm)^[30]。超薄平导能筋熔化后几乎不发生流动,焊头几乎没有向下的位移,避免了上述问题。在该方法基础上,他们研究了焊接速度对接头力学性能的影响。研究指出,当焊接速度过慢(40 mm/s)时,接头出现严重过热;焊接速度过快(大于60 mm/s),接头中存在大量未熔合缺陷;在60 mm/s焊接速度下的平均拉剪强度为(29.5±4.9) MPa,与“零流动”超声波点焊产生的接头强度相当。

Villegas 教授团队在使用平导能筋焊接时发现接头存在质量波动大的现象,接头中存在大量的未熔合缺陷,如图5所示^[29,31]。为此他们提出了采用网状导能筋,网状导能筋中间的空隙使其在焊接过程中更容易膨胀和变形,网格中的交叉结点与工件接触并且在整个焊缝上均匀分布,如图6(a)所示^[31]。焊接过程中,在焊机施加的高循环应变下,网状导能筋在工件之间预成形,导能筋与工件接触面积逐渐增大,形成类似平导能筋的结构,如图6(b)所示^[31],同时又具有比平导能筋具有更均匀的产热,形成了更均匀的焊接区域,从而明显改善接头质量的一致性,减少未熔合和孔隙缺陷。最终得到焊缝的拉剪强度达到了(33.7±2.4) MPa,相比使用平导能筋((18.8±6.2) MPa)提高了近80%。

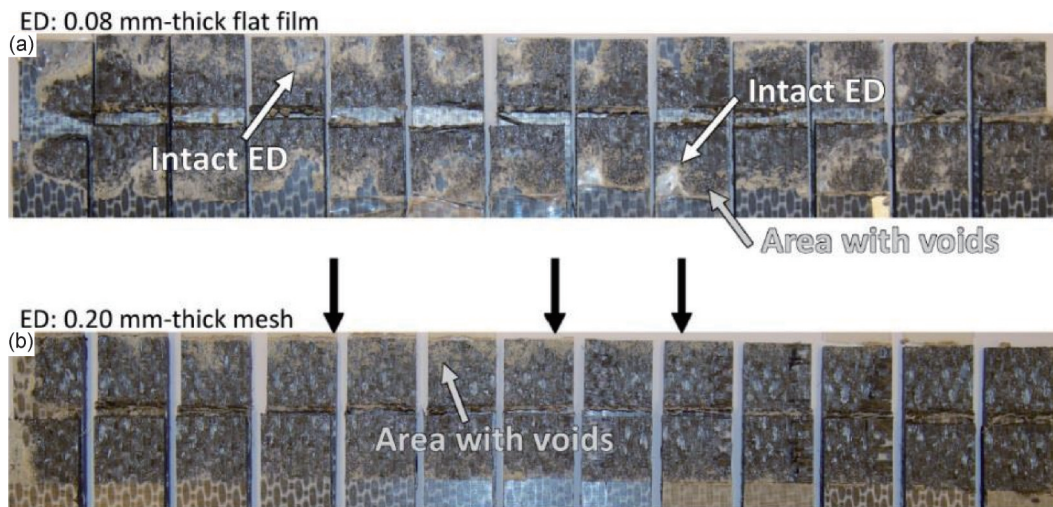


图5 平导能筋和网状导能筋接头断面形貌对比^[29,31]

(a)0.08 mm厚平导能筋; (b)0.20 mm厚网状导能筋(焊接速度45 mm/s,焊接压力500 N,振幅82.5 μm)

Fig.5 Comparison of fracture morphology of joints between flat and mesh ED^[29,31]

(a)0.08 mm thick flat ED; (b)0.20 mm thick mesh ED (welding speed 45 mm/s, welding pressure 500 N, amplitude 82.5 μm)

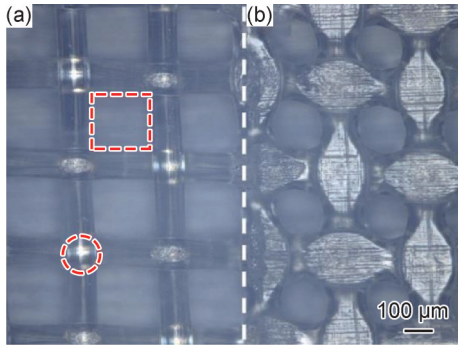


图 6 网状导能筋顶视图^[31]

(a)网状导能筋的空隙与交叉结点;(b)网状导能筋的预成形

Fig.6 Top view of a mesh ED^[31]

(a)space and cross nodes of mesh ED;(b)preforming of mesh ED

3 CF RTP 超声波连续焊工艺特点

3.1 冷却固结

熔融的 CFRTP 在冷却凝固过程中需要施加一定的压力以保证树脂中的高分子链发生充分的扩散和缠结。在超声波点焊时,焊接完成后焊头会依然作用在待焊材料上一段时间,以保证接头发生充分的固结。然而在超声波连续焊过程中,焊头一直在连续运动,其不能对正在冷却的焊缝施加压力。针对该问题, Villegas 教授团队在超声波连续焊装置中增设了一个随焊头移动的固结装置(consolidator),如图 7 所示^[32]。研究发现固结装置和焊头之间的距离 d 对焊接

质量具有重要影响。这个距离的设置应该保证固结装置下方材料的温度恰好处于凝固的关键温度区间。 Villegas 团队通过研究点焊状态下得到高质量焊点所需要的最小固结压力和时间,确定了固结装置的固结压力和长度分别为 1.6 MPa 和 40 mm。共考虑了 3 种固结距离,分别为 18.4、63 mm 和 86.4 mm,根据最终获得接头的拉剪强度判断最佳的固结距离为 86.4 mm,最差的为 18.4 mm。造成此现象可能的原因有两点:第一,不同的固结距离决定了不同的冷却时间,较短的冷却时间导致施加固结压力时焊缝处挤出的树脂过多,如图 8 所示^[32],显著降低了焊缝的局部树脂体积分数,在固结装置移开后,这部分焊缝内部会回弹而引起孔隙;第二,冷却时间太短导致冷却不充分,使得焊缝内部发生了一定程度的解构,使其无法在固结压力下顺利固化,从而形成孔隙。

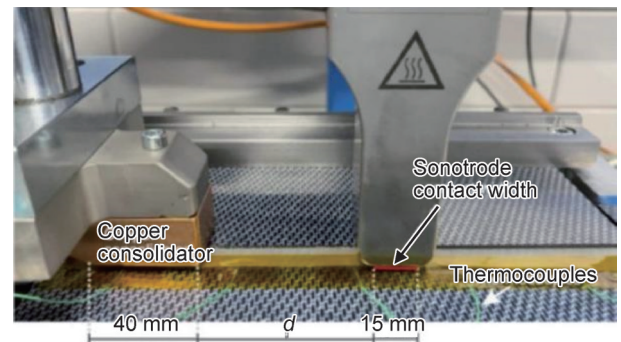


图 7 超声波连续焊中的固结装置^[32]

Fig.7 Consolidator in ultrasonic continuous welding^[32]

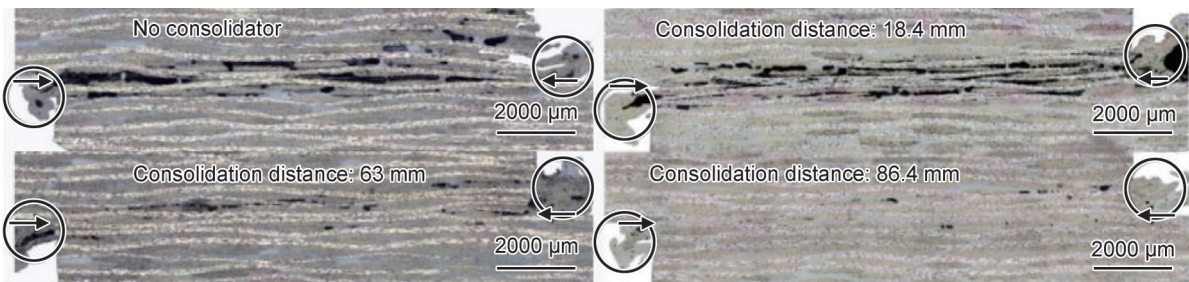


图 8 超声波连续焊接头横截面显微照片^[32](黑色箭头表示焊接界面,灰色圆圈表示纤维和树脂挤出)

Fig.8 Cross-sectional micrograph of ultrasonic continuous weld joint^[32](black arrows indicate the weld interface, gray circles indicate fiber and resin extrusion)

3.2 焊接工艺参数

Villegas 团队研究了振幅、焊接压力和焊头移动速度的匹配。研究发现当使用更大的焊接压力时,可以提高焊头移动速度;而使用更低的振幅时,需要降低焊头移动速度^[33]。焊接压力 500 N 和振幅 80 μm 条件下的最佳焊接速度为 35 mm/s,将焊接压力增大到 1500 N,同时保持振幅(80 μm)恒定,则最佳焊接速度变为 45 mm/s;对于焊接压力 500 N 和振幅 60 μm 条件

下的最佳焊接速度为 15 mm/s。

德国宇航中心的 Engelschall 等^[26]焊接了 1.9 mm 厚连续纤维增强 PPS,使用 0.2 mm 厚纯 PPS 作为导能筋。结果指出使用更高的振幅或更低的焊头移动速度有利于提高接头强度。研究还发现焊接压力和固结压力还可能产生交互作用,比如两者都处于高水平或低水平,会比混合水平(例如高焊接压力 and 低固结压力)得到的焊缝具有更高的 LSS。但是与超声波单

点焊接相比,连续焊接头强度更低(约为单点焊接头强度的67%)。这主要是由于焊头的连续运动导致维持时间过短,工件接触界面分子链的扩散与缠结不足。

Villegas团队^[34]研究了使用端面为圆柱形的焊头焊接的工艺特点,如图9所示。使用圆柱形表面的焊头的目的是为了焊接一些曲面结构。研究表明由于焊头与工件的接触面积变小,单位时间内由焊头向工件提供的焊接能量降低,因此具有降低焊接界面处以及工件内部温度的效果,从而可以避免在使用矩形焊头时容易发生的孔隙或纤维/树脂挤出的问题。除此之外,冷却速率的增加也给使用尺寸更小的固结装置以及更短的固结距离提供了可能性,但因为焊接能量的降低同时也需要降低焊接速度和增加焊接力以补偿焊接能量的不足。

Ahanpanjeh等^[35]研究了焊头倾斜(小于 5°)对连续焊接头质量的影响。研究指出沿焊缝宽度方向发生倾斜时,当焊头倾斜超过 4° 时会导致焊接面积和焊接强度的显著降低,焊缝一侧会被焊头压得更紧,出现材料过热挤出和材料分层缺陷,而另一侧则由于焊头

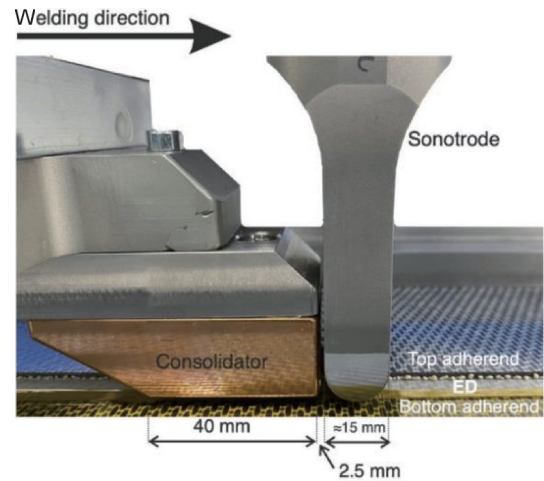


图9 端面为圆柱面的超声波焊头和与其对应的固结装置^[34]

Fig.9 An ultrasonic horn with cylindrical end face and corresponding consolidator^[34]

与工件接触不牢出现未熔合缺陷,如图10(a)所示^[35]。当焊头沿焊缝长度方向,即焊接方向倾斜时,焊头依然可以对整个焊缝宽度区域提供均匀的压力,焊缝成型良好,如图10(b)所示^[35],因此对焊接质量影响不大。

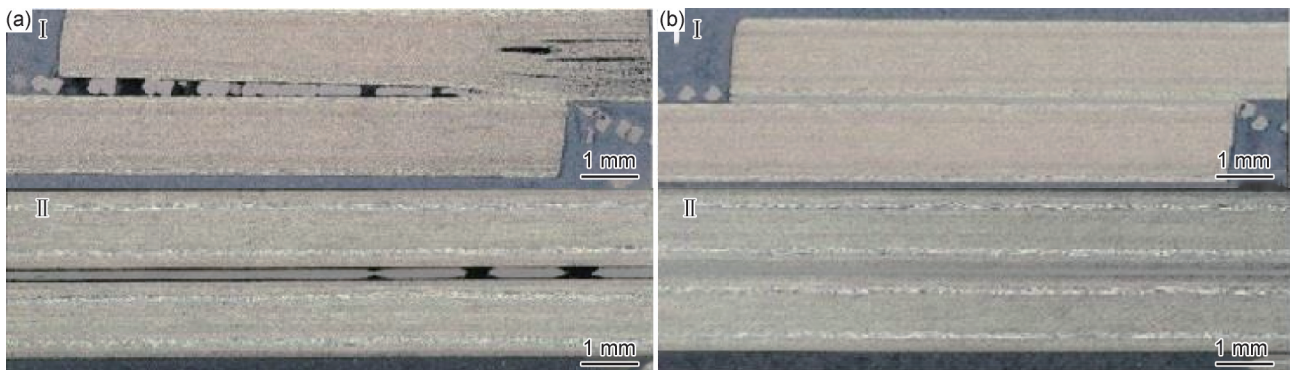


图10 沿焊缝宽度(a)和长度(b)方向倾斜所得焊缝横向(I)与纵向(II)的截面^[35]

Fig.10 Cross-section of transverse(I) and longitudinal(II) of weld obtained by tilting along width (a) and length (b) of weld^[35]

表1^[25-26, 29, 31-35]总结了超声波连续焊工艺参数对接头性能的影响。从表中可见目前国际上仅对2种材料开展了超声波连续焊研究,即碳纤维增强聚苯硫醚(CF/PPS)和碳纤维增强的低熔点聚芳醚酮(CF/LMPAEK)。对于航天航空领域常用的碳纤维增强聚醚醚酮(CF/PEEK),尚未见对其超声波连续焊的报道。其原因主要是CF/PEEK具有较高的熔点(约 343°C)和热加工温度($360\sim 400^\circ\text{C}$),而CF/PPS的熔点约 280°C ,CF/LMPAEK熔点约 305°C ,因此CF/PEEK焊接难度更大。表1中还可以发现使用平导能筋或网状导能筋的焊接速度普遍在 45 mm/s 以下,而使用超薄导能筋可

以实现更高的焊接速度(60 mm/s),这对于高效率的焊接生产具有重要意义,然而使用超薄导能筋的研究仅有1篇论文,其普适性还有待进一步验证。通过表1还可以发现一个现象,即超声波焊头端面的形状对焊接参数的选取和接头性能具有影响。如文献[26]中采用球面焊头时,需要采用的焊接速度以及得到的接头强度会低于采用矩形焊头;而采用圆柱面焊头时,则需要采用更低的焊接速度,且接头强度低于矩形焊头^[34]。根据这些现象可以推测,超声波连续焊中焊头与工件的接触面积越小,所需采用的焊接速度就要更低,接头性能也会有所降低,但该推测也需要进行更广泛地验证。

表 1 超声波连续焊工艺参数影响的总结

Table 1 Summary of the influence of ultrasonic continuous welding process parameters

Material	Ultrasound system	Energy director	Sonotrode shape & size/mm	Welding pressure	Peak-to-peak amplitude/ μm	Welding speed/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	Consolidation pressure	Consolidation distance/mm	Single lap shear strength/MPa	Ref.
1.85 mm CF/PPS	VE20	0.20 mm	Rectangular 27×15	500 N	80	35	800 N/ 1.6 MPa	86.4	39.6±2.3	[25]
	SLIMLINE	PPS mesh		500 N	70	35	800 N/ 1.6 MPa	86.4	37.2±2.5	
	DIALOG 6200			500 N	80	65	800 N/ 1.6 MPa	86.4	25.0±3.9	
1.90 mm CF/PPS	Branson DCXs	0.20 mm	Spherical diameter 25	450 N	97.5%	30	0.65 MPa		24.7	[26]
	20VRT	PPS film		600 N	100%	25	0.5 MPa		23.3±1.6	
1.92 mm CF/PPS	C20-10, Rinco	0.08 mm	Rectangular	500 N/ 2.6 MPa	49.5	60			29.5±4.9	[29]
1.85 mm CF/PPS	C20-10, Rinco	0.08 mm	Rectangular	500 N	82.5	45			18.8±6.2	[29, 31]
		PPS film	30×14.9							
1.85 mm CF/PPS	HiQ DIALOG 6200	0.20 mm	Rectangular	500 N/ 2.6 MPa	80	35			15.1±2.6	[32]
		PPS mesh	27×15	500 N/ 2.6 MPa	80	35	800 N/ 1.6 MPa	18.4	9.5±2.9	
				500 N/ 2.6 MPa	80	35	800 N/ 1.6 MPa	63	38.6±2.7	
				500 N/ 2.6 MPa	80	35	800 N/ 1.6 MPa	86.4	39.6±2.3	
				500 N/ 2.6 MPa	80	35	800 N/ 1.6 MPa			
1.85 mm CF/PPS	VE20	0.20 mm	Rectangular	500 N	80	35			≈27	[33]
	SLIMLINE	PPS mesh	30×15	1500 N	80	45			≈29	
	DIALOG 6200			500 N	60	15			≈28	
1.85 mm CF/PPS	VE20	0.20 mm	Cylindrical	1000 N/ 43-53 MPa	80	12	800 N/ 1.6 MPa	2.5	33.5±1.4	[34]
2.2 mm CF/ LMPAEK	Herrmann	0.50 mm	Rectangular	1000 N	75%	16	600 N		Impact of alignment of sonotrode	[35]
		LMPAEK mesh	28×14.9							

3.3 焊接温度场

Villegas 团队观察到,相比超声波点焊,在超声波连续焊过程中整个工件沿其厚度方向被加热的程度更明显^[25]。这种现象会导致材料体系温度过高,熔融材料挤出过多,产生孔隙,接头完整性下降。通过对焊接过程进行测温及简单的温度场计算,他们推测上工件的高温是由于上部工件吸收了大部分振动能量后材料本身的粘弹产热引起的;焊接界面的高温是由于超声振动沿焊接方向传播,导致导能筋提前被预热以及较大的搭接尺寸导致导能筋的挤压流减少引起

的;下工件的高温是由焊接界面向下工件进行热传导引起的。为了抑制加热,还引入了固结装置安装在焊头前方充当抑制单元,用于抑制水平方向上振动的传递,以此来减少水平方向的传热,如图 11^[25]所示。研究表明,添加了固结装置在焊头前方作为抑制单元后,各测温点峰值时刻前的温度有明显下降,证明固结装置减少了焊头到达测温点前水平方向的振动传热。通过增加焊接速度以及降低焊接振幅的方式减少连续焊过程中输入的总振动能量是缓解厚度方向均被加热的方法。

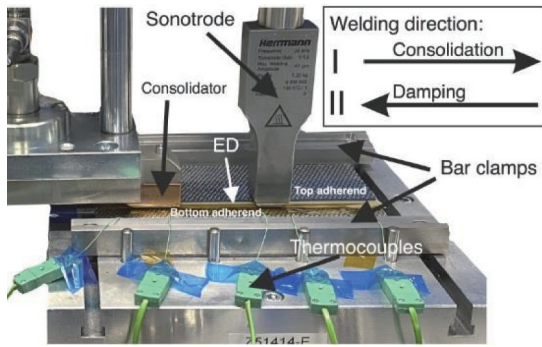


图11 超声波连续焊装置(焊接方向向左)^[25]

Fig.11 Ultrasonic continuous welding device (welding direction is to the left)^[25]

4 CFRTP超声波连续焊质量监测

德国宇航中心 Görick 等^[36]使用一维卷积神经网络(1DCNN)和全连接神经网络(FCNN)预测超声波连续焊质量。使用了焊接压力、振幅、功率、焊接速度、固结压力、导能筋层厚、导能筋层数和试样位置9个参数作为输入,以接头质量等级(分类)和接头强度(回归)作为输出。研究表明模型的整体预测精度为72%。对于CFRTP超声波点焊,使用机器学习或深度学习模型进行焊接质量预测时,预测精度可达99%以上^[37-38]。这表明超声波连续焊的质量监测还有很大的改进空间。

荷兰代尔夫特大学 Akay 等^[39]发现焊接线厚度(weld-line thickness),即焊接后焊接区域的总厚度减去上、下工件焊接前的厚度,与接头剪切拉伸强度具有相关性。据此,他们在超声波连续焊接系统中引入了2D激光传感器,分别测量焊接前上、下工件厚度,以及焊接后焊接区域总厚度,建立相关算法,得到焊接线厚度。当焊接线厚度发生异常突变时,对应的接头中存在未熔合区域。

5 结束语

本文从焊接装备、接头设计、焊接工艺、质量监控四个方面梳理了CFRTP超声波连续焊研究现状,主要结论及展望如下。

(1)超声波连续焊接过程中使用超薄导能筋(0.08 mm)具有在较高焊接速度(60 mm/s)下提供高强度接头的潜力,有望在未来热塑性复合材料组件的结构连接中发挥重要作用,但该方法的普适性还有待进一步验证。

(2)超声波连续焊接过程中,使用网状导能筋可以提供更均匀的产热,形成更均匀焊接区域,减少未

熔合和孔隙缺陷,提高焊接接头质量的一致性。

(3)在超声波连续焊接过程中添加固结装置,且采取合适的固结压力与固结距离可以减少未熔合和孔隙缺陷,提高焊接接头质量。

(4)超声波连续焊工艺参数(导能筋形状、焊头形状、焊接振幅、焊接压力、焊头移动速度、固结压力、固结距离、固结装置尺寸等)存在复杂的交互作用。目前比较明确的是导能筋形状和焊头形状会影响焊接参数的选择,高振幅与高焊接压力促进产热,进而可采用更高的焊接速度。但这些参数的选取(如固结装置相关参数)缺乏理论指导。目前国际上仅对CF/PPS和CF/LMPAEEK开展了研究,缺乏更广泛的材料验证。后续工作可以着重研究工艺参数之间更深层次的关系,并且增加研究材料的种类。

(5)超声波连续焊过程中振动沿焊接方向的传播使得工件整体被加热,导致连续焊过程中焊接界面的温度明显高于超声波点焊,可以采用将固结装置安装在焊头前的方法抑制振动向下游的传播,以此减少这类热量传输。总体上,超声波连续焊过程中存在复杂的温度场,接头热场控制难度大,后续工作可以着重研究温度场的分布规律与调控措施。

(6)焊接质量监测方面研究少,目前已有的对于此类任务预测率最高的是基于机器学习技术,但预测精度还有待进一步提高。

总之,超声波连续焊作为CFRTP构件焊接的最新发展之一,目前的研究体量和研究深度还非常有限,其尚有大量的科学和技术问题有待研究,如焊接温度场的演变规律、焊接工艺参数的交互作用、导能筋的设计方法、焊缝微观组织的演化规律、焊接接头力学性能、焊接质量监测技术等。

参考文献

- [1] 熊需海.“复合材料焊接技术”专题序言[J].材料工程,2023,51(7):封2.
XIONG X H, Preface to the special topic of “composite welding technology”[J].Journal of Materials Engineering, 2023, 51(7): 2nd cover.
- [2] 马志阳,高丽敏,徐吉峰.复合材料在大飞机主承力结构上的应用与发展趋势[J].航空制造技术,2021,64(11):24-30.
MA Z Y, GAO L M, XU J F. Application and development for composite primary structure in large aircraft[J].Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(11): 24-30.
- [3] 刘嘉鸣,全东,赵国群.航空复合材料连接成形技术研究进展[J].机械工程学报,2023,59(20):119-142.
LIU J M, QUAN D, ZHAO G Q. Progress in joint forming technology of aviation composites[J].Journal of Mechanical Engineering,

- 2023, 59(20):119-142.
- [4] 胡记强, 王兵, 张涵其, 等. 热塑性复合材料构件的制备及其在航空航天领域的应用[J]. 宇航总体技术, 2020, 4(4):61-70.
HU J Q, WANG B, ZHANG H Q, et al. Fabrication of thermoplastic composite components and their application in aerospace[J]. *Astronautical Systems Engineering Technology*, 2020, 4(4):61-70.
- [5] 熊需海, 焦梦媛, 田琳, 等. 先进聚合物基复合材料电阻植入焊接技术研究进展[J]. 材料工程, 2023, 51(7):1-11.
XIONG X H, JIAO M Y, TIAN L, et al. Research progress in resistance implant welding of advanced polymeric composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2023, 51(7):1-11.
- [6] 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.
- [7] 刘彬, 安卫龙, 倪楠楠. 国外热塑性复合材料工程应用现状[J]. 航空制造技术, 2021, 64(22):80-90.
LIU B, AN W L, NI N N. Application status of thermoplastic composite materials in foreign engineering[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2021, 64(22):80-90.
- [8] ISHIKAWA T, AMAOKA K, MASUBUCHI Y, et al. Overview of automotive structural composites technology developments in Japan[J]. *Composites Science and Technology*, 2018, 155:221-246.
- [9] AGEORGES C, YE L, HOU M. Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites: a review[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2001, 32:839-857.
- [10] 周利, 秦志伟, 刘杉, 等. 热塑性树脂基复合材料连接技术的研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(10):3177-3183.
ZHOU L, QIN Z W, LIU B, et al. Progress on joining technology of thermoplastic resin matrix composites[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(10):3177-3183.
- [11] 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*, 2019, 173:107014.
- [12] GARDINER G. MFFD longitudinal seams welded, world's largest CFRTP fuselage successfully completed [J/OL]. *CompositesWorld*, 2024-05-07 [2024-06-15]. <https://www.compositesworld.com/news/mffd-longitudinal-seams-welded-worlds-largest-cfrtp-fuselage-successfully-completed>.
- [13] MASON H. Thermoplastic primary aerostructures take another step forward[J/OL]. *CompositesWorld*, 2019-06-28 [2024-02-17]. <https://www.compositesworld.com/articles/thermoplastic-primary-aerostructures-take-another-step-forward>.
- [14] FRANCIS S. Thermoplastic composites: Poised to step forward [J/OL]. *CompositesWorld*, 2023-02-22 [2024-02-17]. <https://www.compositesworld.com/articles/thermoplastic-composites-poised-to-step-forward>.
- [15] GARDINER G. Thermoplastic composites welding advances for more sustainable airframes [J/OL]. *CompositesWorld*, 2022-09-28 [2024-06-15]. <https://www.compositesworld.com/articles/thermoplastic-composites-welding-advances-for-more-sustainable-airframes>.
- [16] HOYT R, CUSHING J, JIMMERSON G, et al. Process for on-orbit construction of kilometer-scale apertures[R]. 2016.
- [17] GARDINER G. CFRTP upper stage propellant tank [J/OL]. *CompositesWorld*, 2022-10-24 [2024-02-17]. <https://www.compositesworld.com/articles/cfrtp-upper-stage-propellant-tank>.
- [18] 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.
- [19] 王静, 程健, 肖存勇, 等. 先进聚合物基复合材料超声焊接研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(9):166-173.
WANG J, CHENG J, XIAO C Y, et al. Progress of ultrasonic welding of advanced polymer matrix composites[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2023, 39(9):166-173.
- [20] 贾明印, 任浩宇, 徐文一, 等. 热塑性复合材料超声波焊接工艺研究进展[J]. 塑料工业, 2023, 11(51):21-26.
JIA M Y, REN H Y, XU W Y, et al. Research progress on ultrasonic welding process of thermoplastic composites[J]. *China Plastic Industry*, 2023, 11(51):21-26.
- [21] UNNIKRISHNAN T G, KAVAN P. A review study in ultrasonic-welding of similar and dissimilar thermoplastic polymers and its composites[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 56:3294-3300.
- [22] LI H J, CHEN C, YI R X, et al. Ultrasonic welding of fiber-reinforced thermoplastic composites: a review[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 120:29-57.
- [23] WANG Y Q, RAO Z H, LIAO S M, et al. Ultrasonic welding of fiber reinforced thermoplastic composites: current understanding and challenges[J]. *Composites Part A*, 2021, 149:106578.
- [24] SENDERS F J M. Continuous ultrasonic welding of thermoplastic composites[D]. Delft: Delft University of Technology, 2016:39.
- [25] JONGBLOED B, TEUWEN J, BENEDICTUS R, et al. A study on through-the-thickness heating in continuous ultrasonic welding of thermoplastic[J]. *Composites Materials*, 2021, 14:6620.
- [26] ENGELSCHALL M, LARSEN L, FISCHER F, et al. Robot-based continuous ultrasonic welding for automated production of aerospace structures [C]//SAMPE Europe Conference, Nantes, France, 2019:2.
- [27] LARSEN L, GÖRICK D, ENGELSCHALL M, et al. Process data driven advancement of robot-based continuous ultrasonic welding for the dust-free assembly of future fuselage structures [C]//5th International Conference and Exhibition on Thermoplastic Composites (ITHEC), 2020:1.
- [28] VILLEGAS I F, GRANDE B V, BERSEE H, et al. A comparative evaluation between flat and traditional energy directors for ultrasonic welding of CF/PPS thermoplastic composites[J]. *Composite Interfaces*, 2015, 22(8):717-729.
- [29] JONGBLOED B, TEUWEN J, PALARDY G, et al. Improving weld uniformity in continuous ultrasonic welding of thermoplastic composites[C]//Proceedings of the 18th European Conference on Composite Materials, Athens, Greece, 2018:6-8.
- [30] SENDERS F, BEURDEN M V, 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(3/4): 83-92.
- [31] JONGBLOED B, TEUWEN J, PALARDY G, et al. Continuous ultrasonic welding of thermoplastic composites enhancing the weld uniformity by changing the energy director [J]. *Journal of Composite Materials*, 2020, 54(15): 2023-2035.
- [32] JONGBLOED B, VINOD R, TEUWEN J, et al. Improving the quality of continuous ultrasonically welded thermoplastic composite joints by adding a consolidator to the welding setup [J]. *Composites Part A*, 2022, 155: 106808.
- [33] 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*, 2020, 203: 108466.
- [34] JONGBLOED B, TEUWEN J, VILLEGAS I F. On the use of a rounded sonotrode for the welding of thermoplastic composites [J]. *Journal of Advanced Joining Processes*, 2023, 7: 100144.
- [35] AHANPANJEH M, KÖHLER F, ADOMAT V, et al. Impact of alignment of the sonotrode on the quality of thermoplastic composite joints in continuous ultrasonic welding [C]// *SAMPE Europe Conference*, Hamburg, Germany, 2022: 6-8.
- [36] GÖRICKA D, LARSEN A L, ENGELSCHALL M, et al. Quality prediction of continuous ultrasonic welded seams of high-performance thermoplastic composites by means of artificial intelligence [J]. *Procedia Manufacturing*, 2021, 55: 116-123.
- [37] WANG B, LI Y, LUO Y, et al. Early event detection in a deep-learning driven quality prediction model for ultrasonic welding [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 60: 325-336.
- [38] LI Y, YU B, WANG B C, et al. Online quality inspection of ultrasonic composite welding by combining artificial intelligence technologies with welding process signatures [J]. *Materials and Design*, 2020, 194: 108912.
- [39] AKAY E, KÖHLER F, VILLEGAS I F. *In-situ* monitoring of weld line thickness in continuous ultrasonic welding of thermoplastic composites [C]// *Proceedings of the 20th European Conference on Composite Materials: Composites Meet Sustainability*, 2022, 616-623.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52075375)

收稿日期: 2024-06-18; 录用日期: 2024-07-22

通讯作者: 李洋(1986—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为碳纤维热塑性复合材料焊接, 联系地址: 天津市津南区雅观路135号天津大学31-291(300354), E-mail: liyang86@tju.edu.cn

(本文责编: 解 宏)