支倩,胡宇航,谭欣荣,等. 无导能筋碳纤维增强尼龙 66 复合材料超声波焊接过程及影响因素[J]. 湖南科技大学学报(自然 科学版), 2024, 39(3):78-84. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.03.010

ZHI Q, HU Y H, TAN X R, et al. Analysis of the Process and Influential Parameters of Ultrasonic Welding of Carbon Fiber Reinforced Nylon 66 Without Energy Director[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition) , 2024, 39(3):78-84. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.03.010

无导能筋碳纤维增强尼龙 66 复合材料 超声波焊接过程及影响因素

支倩^{1,2,3},胡宇航^{1,2},谭欣荣^{1,2*},舒鹏¹,马金铭¹

(1.湖南科技大学 材料科学与工程学院,高功效轻合金构件成形技术及耐损伤性能评价湖南省工程研究中心,湖南 湘潭 411201;
 2.高温耐磨材料及制备技术湖南省国防科技重点实验室,湖南 湘潭 411201;
 3.新能源储存与转换先进材料湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201)

摘 要:研究了无导能筋碳纤维增强尼龙 66 复合材料的超声波焊接过程,并分析了板材与焊头之间角度及上下板材间的 间隙对焊接过程的影响.结果表明:超声波焊接由库伦摩擦、非稳态熔化、稳态熔化和凝固 4 个阶段构成.适当提高焊接压力 和焊接时间可以增加稳态熔化阶段时间,而当焊接时间超过 2.9 s,会出现上板塌陷的 T3 阶段.当角度大于 4°或板间隙大于 1.0 mm 时,由于界面 I 和界面 II 的接触不再紧密而出现接头强度的快速下降.存在角度的接头在位移曲线上表现为多个 "平台"特征,而板间隙的接头减少了稳态熔化阶段的时间.

关键词:超声波焊接;导能筋;位移曲线;角度;板间隙

中图分类号:TG407 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2024)03-0078-07

Analysis of the Process and Influential Parameters of Ultrasonic Welding of Carbon Fiber Reinforced Nylon 66 Without Energy Director

ZHI Qian^{1,2,3}, HU Yuhang^{1,2}, TAN Xinrong^{1,2}, SHU Peng¹, MA Jinming¹

(1. School of Material Science and Engineering, Hunan Provincial Engineering Research Center of Forming Technology and Damage Resistance Evaluation for High Efficiency Light Alloy Components, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

Hunan Provincial Key Defense Laboratory of High Temperature Wear-resisting Materials and Preparation Technology, Xiangtan 411201, China;
 Hunan Provincial Key Laboratory of Advanced Materials for New Energy Storage and Conversion, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Ultrasonic welding of carbon fiber reinforced Nylon 66 without energy director is investigated and the effect of horn incline and gap between workpieces are analyzed. Experimental results show that the ultrasonic process consists coulomb friction, unsteady melting, equilibrium of material melting and outflow, and cooling down phases. Properly increasing weld pressure and time can prolong the equilibrium phase, whereas a collapse phase of T3^{\circ} occurrs with weld time exceeding 2.9 s. With the horn incline above 4^{\circ} or gap between workpiece exceeds 1.0 mm, the joint strength decreases significantly due to the loose contact at interfaces I and II. Comparing with the normal joint, the displacement curve for joint with horn incline displays multi-platform characteristic and the duration of equilibrium phase decreases for that of gap between workpieces.

Keywords: ultrasonic welding; energy director; displacement; horn incline; gap between workpieces

收稿日期:2021-10-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51905167);湖南省自然科学基金资助项目(2024JJ4019)

^{*}通信作者,E-mail:tanxinrong0@163.com

汽车轻量化是国家节能减排战略的迫切需要,汽车重量每降低10%,油耗和碳排放量可降低8%^[1].高 分子材料成本低、质轻、加工性能好,在汽车工业扮演着愈来愈重要的角色,"以塑代钢"成为未来汽车发 展的主导方向.碳纤维增强尼龙66复合材料(CF/PA66)由于密度小、比强度高、比模量大、较好的阻尼性 能等优点,常用于制造汽车零部件(如保险杠、仪表台加强板、空调风道及内饰)^[2-3],其高强度连接成为汽 车制造中面临的重要问题.超声波焊接由于效率高、焊接质量美观、易于实现自动化等优点而被广泛应用 于 CF/PA66复合材料的连接.

超声波焊接技术主要通过界面的摩擦和材料的黏弹性耗散产生局部高温而达到连接的目的.超声波 焊接高分子材料时,往往需要在板材表面加工导能筋,导能筋能够把焊接能量集中在焊合面,获得高质量 的连接接头^[4-8].ALIOSIO^[4]通过理论计算和实验验证了导能筋的引入使焊合面的能量更加集中,升温速 率更快;CHUAH等^[5]研究了导能筋形状对超声波焊接 ABS 和 PE 的影响,结果表明半圆形导能筋的效率 最高,其次为矩形导能筋和三角形导能筋;BHUDOLIA^[6]等研究了单半圆形导能筋、双半圆形导能筋和平 导能筋对超声波焊接 Elium 树脂的影响,双半圆形导能筋接头的强度最高,而平导能筋接头的强度仅为前 者的 65%;VILLEGAS^[7]研究了三角形导能筋的超声波焊接碳纤维增强聚乙烯亚胺,三角形导能筋的分布 和大小都会对焊接质量产生影响,横向分布的导能筋可以增加焊接的稳定性;VILLEGAS^[8-9]和 LEVY^[10] 还研究了平导能筋对超声波焊接碳纤维增强聚乙烯亚胺过程的影响,其焊接过程可分为 5 个阶段,其中第 四阶段的持续时间决定了接头质量;PALARDY^[11]在 VILLEGAS 工作的基础上发现,导能筋的厚度对 CF/PEI超声波焊接过程有很大影响,当导能筋厚度比较薄时(0.06 mm),导能筋和板材同时熔化,而厚度 增加到 0.25 mm 以上时,导能筋先熔化而板材后熔化.

虽然导能筋能在一定程度上提高焊接质量,但是导能筋需要额外加工,成本高,对于形状复杂的零部件,易受工件尺寸及位置限制等问题,难以实现汽车工业的自动化焊接,不利于推动汽车工业智能制造和工业4.0 化进程.因此,部分国内外学者及汽车厂商开始研究"去导能筋化".WANG^[12]研究了碳纤维增强尼龙6复合材料无导能筋超声波焊接的影响因素,发现焊接能量与接头质量密切相关.焊接能量增加会增加焊合效率和焊接面积,而过多的能量则会导致材料发生退化,降低接头强度;TAO等^[13]、王晓林^[14]、支倩^[15]研究了不同高分子板材的无导能筋超声波焊接,均发现由于没有导能筋对焊接界面上能量的引导分配,焊接能量过于集中在焊头正下方.与有导能筋接头相比,焊接输入能量较低时,无导能筋接头焊合面积较小.而增加焊接能量,虽然焊合面积增大,但其接头材料发生热分解,产生多孔缺陷,导致接头强度较低, 但通过合理地控制焊接参数,板材也能够实现有效连接.目前,关于无导能筋高分子材料超声波焊接过程的相关研究较少,焊接接头成形机理还未探明.因此,本文主要研究无导能筋碳纤维增强尼龙 66 复合材料超声波焊接接头成形机理并探讨实际生产中的因素对接头的影响.

1 试验材料及方法

试验材料为长度 2 mm,直径 7 μm 的 T300 型 24K 碳纤维(日本东丽)、尼龙 66 料粒(河南神马), 采用注塑工艺加工出尺寸为 132 mm×38 mm×4 mm 的板材.对注塑板材进行拉伸性能测试,其拉伸强度 为(99.2±3.0) MPa,弹性模量为(8 936±421) MPa.

采用 KZH-2026 多功能数控气动超声波焊接机 (中国威海凯正超声波仪器有限公司)进行焊接,焊 接机的额定功率为 2.6 kW,频率为 20 kHz,振幅为 25 μm.焊接过程中,通过位移传感器和功率传感器分 别记录焊接过程中焊头向下的位移及输出功率实时 变化情况.在待焊板内放入热电偶来采集焊接过程中 的温度变化情况,如图 1 所示.利用 MTS-810 试验机



图1 焊接过程中温度测量(单位:mm)

对焊接接头的拉伸强度进行评估,每个焊接条件的试样取3组,取其峰值力的平均值作为拉伸强度.

2 试验结果分析

2.1 无导能筋 CF/PA 66 超声波焊接

图 2 是不同焊接参数下无导能筋 CF/PA 66 复合材料超声波焊接接头强度和面积变化.随着焊接时间的 增加,接头强度先增加后减少,而焊接面积先随着焊接时间的增加而增加后趋于一稳定值.在不同焊接压力 下,最佳焊接时间(接头达到最大强度所对应的时间)随着焊接压力的增加而减少.当焊接压力为 0.13 MPa 时,最佳焊接时间为 2.9 s,增加焊接压力到 0.15,0.20 MPa 时,最佳焊接时间分别缩短为 2.1,1.7 s.这一结果主 要与焊接接头的产热有关,超声波焊接过程中摩擦产热和黏弹性耗散可用式(1)和式(2)表示^[10].

$$Q_{\text{frie}} = \alpha_{\text{h}}^{2} \frac{\omega}{\pi} \mu \left| \delta_{yy}^{**}(x) \delta u^{*}(x) \right|; \tag{1}$$

$$Q = \frac{\omega \varepsilon_{0}^{2} E''}{2}. \tag{2}$$

式中: α_h 为锤击系数; $\omega = 2\pi f, f$ 为振动频率; μ 为焊头与板材之间的摩擦系数; δ_{yy}^{**} 为施加在焊接面上的压力; ε_0 为材料应变;E''为材料的损耗模量: δ_{yy}^{**} , ε_0 与Q成正比,因此焊接压力越大,产热越多,达到最大焊接面积所需的时间缩短.



图 2 焊接时间和压力对焊接接头的影响

2.2 无导能筋 CF/PA 66 超声波焊接过程分析

根据 2.1 的实验结果及实际生产工况,选择 0.15 MPa 的焊接压力、2.1 s 的焊接时间为最佳焊接参数. 对最佳参数下的焊接过程进行温度测量,并记录位移和功率的变化,如图 3 所示.根据高分子材料振动焊 的变化过程^[16],再结合无导能筋 CF/PA 66 焊接过程中的特征曲线,可以分为 4 个阶段,分别记为 T1,T2, T3 和 T4.



图 3 无导能筋 C_f/PA 66 超声波焊接过程的温度,位移和功率变化

T1(库伦摩擦阶段)——界面 I(焊头与上板的接触面)和界面 II(上板与下板的焊合面)的温度在超 声波振动作用下上升.材料表面的小突起在焊接压力的作用下,开始软化并使焊件之间的接触逐渐紧密. 在振动热量作用下,材料发生热胀,焊头向上移动,表现为位移曲线上的下降,而耗散功随着振动摩擦的进 行而线性增加.

T2(非稳态熔化阶段)——随着焊接过程的进行,界面I和界面II的温度继续上升,且界面II处的升 温速率大于界面I的升温速率(界面I热量主要来自上板的黏弹性耗散及摩擦,而铝焊头导热系数大,一 部分热量通过焊头传导出去).根据Stoke的理论^[16],此阶段焊接件表面的小突起完全熔化,焊接面II的材 料不断熔化并开始慢慢形成熔体薄膜,耗散功达到最大值.但此时材料熔化的速度小于熔体在焊接面的铺 展速度,因此在焊头的位移曲线上表现为非稳态增加.

T3(稳态熔化阶段)——当界面 II 材料熔化速度与熔体向外铺展的速度达到平衡时,焊头的位移以一定的速率增长,界面 II 需要越来越少的能量用于补偿熔膜的扩展^[9],焊头的位移稳定增加而耗散功则逐渐减小,直至超声波焊接振动停止.

T4(凝固阶段)——超声波振动停止,熔化的材料在焊接压力的作用下凝固.界面I和界面II的温度都 开始下降,焊头的位移会相对有少量的增加.

图 4 展示了不同焊接阶段的上板表面、焊合面以及截面的形貌.随着焊接时间的增加,上板表面的焊 痕越来越明显,焊合面的面积逐渐增加,焊接时间少于 2.1 s(最佳焊接时间)时,截面形貌变化不大,而增 加焊接时间到 2.9 s,焊合面和界面处可以观察到明显的多孔区域,上表面也出现明显的塌陷.



图4 不同阶段的上板表面、焊合面以及截面形貌

根据前期研究和文献可知^[8,10,17]:无导能筋 CF/PA 66 复合材料超声波焊接接头质量主要与 T3 阶段 有关,而稳定熔化膜形成阶段与焊接时间和压力密切相关.图 2 的结果表明:焊接压力的增加可以减少获 得最佳焊接质量所需的焊接时间,而这个结果可能与其第三阶段的特点有关.对同一焊接时间下不同焊接 压力,以及同一压力下不同焊接时间的接头焊接强度和位移曲线进行记录,结果如图 5 所示(焊头位移的 起始值在上一根曲线的基础上加 0.05 mm).从图 5a 可以看出:不同焊接压力下,位移曲线都表现出上述 4 个阶段.如前所述,在焊接时间都为 2.1 s 时,增大焊接压力会提高生热效率^[11],缩短了完成前 2 个阶段 所需的时间,因而位移曲线上 T3 阶段的开始时间提前,更多材料发生熔化,产生更厚的熔膜.因此,适当地 提高焊接压力有利于提高焊接接头质量.

图 5b 为在同一压力下焊接不同时间的位移曲线,曲线在焊接前期具有类似的形状,而焊接时间的增加,增加了 T3 阶段的持续时间与焊头位移,接头的焊接强度也得到了提高.然而,当焊接时间增加到 2.9 s时,焊头位移曲线在 T3 阶段后出现了斜率更大的一段斜线,记为 T3´.T3´阶段位移的快速增加是由于焊头与上表面之间的高温导致焊头在压力的作用下压入上板(图 5,2.9 s 形貌).



图5 不同焊接参数下的接头位移曲线变化

2.3 界面 I 与界面 II 接触情况对无导能筋 CF/PA 66 超声波焊接影响

上述结果是在保证界面 I 和界面 II 紧密接触的情况下进行,而在实际焊接生产过程中,由于各种原因 (焊点周边的变形,材料内部与边缘尺寸不连续等),导致界面 I 与界面 II 在焊接时可能并非始终处于紧 密接触状态.为了研究不同接触状态对无导能筋 CF/PA 66 超声波焊接的影响,本文模拟了焊头与板材间 存在角度以及板材之间存在间隙时的无导能筋 CF/PA 66 超声波焊接,如图 6 所示.图 6a 是焊头与上板存 在角度的示意图,通过改变可调节支柱的位置来获得相应的倾斜角,而板材之间的间隙主要通过改变可调 节薄板的厚度来获得不同的间隙.

根据图 6 对无导能筋 CF/PA 66 在最佳参数下进行超声波焊接,结果如图 7 所示.当焊头与板材之间 存在 2°倾斜角时,接头的强度没有明显的下降,继续增大倾斜角到 4°和 6°时,接头强度快速下降,焊接面 积也表现出相似的趋势.对板材间存在间隙的情况,增加板间隙到 0.5,1.0,1.5,2.0 mm 时,接头拉伸强度 分别降低了 11.5%,41.0%,59.0%,72.0%,接头的强度和面积几乎呈直线下降.结果表明:当焊头与板材倾 斜角大于 4°或者板材之间存在间隙时,焊接接头焊接质量快速下降.





图 7 不同角度和间隙下接头强度和面积的变化

为进一步分析界面 I 与界面 II 的接触情况对接头强度的影响机制,对存在倾斜角和板间隙的焊头位 移变化进行了记录和分析,结果如图 8 所示.对于存在角度的接头,其位移曲线与正常接头有较大的区别. 随着角度增加,焊头与上板接触面积逐渐减小,而压力逐渐增大.开始振动时,塌陷速度随着角度增加而明 显地增加.而两板间的压力随着角度的增加而减少,由于大多能量被上板表面吸收,在相同的时间内,两板 间的熔化面积随着角度的增加而减少,所以强度也随之降低.而不同板材间隙的接头位移曲线趋势比较类 似,当板间隙小于 0.5 mm 时,与无间隙的位移曲线相似,而当间隙增大时,曲线出现了不同的趋势.超声波 刚开始振动时,焊头与上板接触,间隙越大,接触面积越小,板材熔化越快.间隙增加到 1.0 mm 以上,由于 接触面积过小,同时一部分压力用于上板的变形,所以焊头与上板的接触力大于两板之间的接触力,上板 与焊头界面的发热明显地大于两板间的发热,上板表面先熔化.随着上板的熔化,上板与焊头间接触面积 变大,吸收热量变少,所以熔深曲线斜率开始减缓.同时两板之间吸收热量增多,接头开始形成稳定熔池, 进入稳定熔化阶段.而对于 0.5 mm 间隙或无间隙,由于焊头与上板接触较大,熔化最先从两板间开始,因 而曲线比较类似.





对正常焊接接头、存在角度和间隙的接头位 移各个阶段特征进行总结对比,如图9所示.与 有无板间隙存在的情况不同,存在角度的焊接接 头表现出多个"平台",并且在焊接开始阶段有 较大的斜率.主要由于焊头倾斜不仅减少了焊头 与上表面的接触面积,也减少了上下板之间的接 触压力.接触面积的减少导致焊头与板材接触处 的材料承受较大的压力,从而上板与下板之间的 压力较小,导致界面Ⅱ处的接触不好.在超声波 振动的作用下,在界面 I 处的材料开始熔化,因 而位移曲线增加较快(o~a'阶段).随着焊接过 程的进行,上表面熔化的材料堆积阻止了焊头的 进一步滑移,因此出现 a'~b'阶段.焊接过程继 续,更多界面Ⅰ处的材料发生堆积,同时界面Ⅱ 处的材料开始熔化,出现 b'~c'阶段.在此阶段, 接头位移继续增加直到上板表面材料再次发生



图9 不同接触情况下焊接接头位移曲线对比

堆积,此时会出现第二个台阶 c'~d'.此过程重复出现直至上下板材之间接触紧密.而之后进入稳定熔化阶段和凝固阶段与正常焊接接头一致.根据上述分析,当界面 I 接触情况不佳时,焊接过程中,大部分能量用于板材之间的熔化,因此存在角度时,接头的强度下降比较明显.

当上下板材之间存在间隙时(≥1.0 mm),接头的位移曲线也可以分为四个阶段.在 o~a"阶段,在焊接 压力和超声波振动作用下,上板发生变形并向间隙内膨胀,因而位移曲线上没有表现出位移下降而是出现 了斜率较大的上升趋势.随着焊接过程的进行,板材在热量的作用下发生软化继续向间隙内膨胀直到上下 板材之间的接触紧密(a"~b").当上下板材之间有较好的接触后,开始出现稳定熔化阶段和凝固阶段.

3 结论

1)无导能筋 CF/PA 66 复合材料的超声波焊接过程(最佳参数下)可分为库伦摩擦、非稳态熔化、稳态

熔化和凝固 4 个阶段;当焊接时间超过 2.9 s 后,会出现 T3'塌陷阶段.

2) 焊接质量与 T3 阶段持续时间密切相关, 而适当增加焊接压力和焊接时间可以延长 T3 阶段的持续时间, 提高接头强度.

3) 焊头倾斜角度及板间隙均会导致接头的焊接面积减小、强度降低,尤其当焊头倾斜角度大于 4°或 者板间隙大于 1.0 mm 时会严重影响焊接接头质量.

4)与正常焊接接头对比,存在倾斜角时,其位移曲线会出现多个"平台",而板间隙的接头位移曲线在振动开始出现较长时间的不稳定接触阶段,减少了稳定熔化阶段的时间.

参考文献:

[1] 高鹏堂. 塑性材料在汽车配件轻量化发展中的应用研究[J]. 内燃机与配件, 2021(19): 39-40.

- [2] HUANG P K, WU M H, PANG Y Y, et al. Ultrastrong, flexible and lightweight anisotropic polypropylene foams with superior flame retardancy[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 116: 180-186.
- [3] ZHANG L, HAN E L, WU Y L, et al. Surface decoration of short-cut polyimide fibers with multi-walled carbon nanotubes and their application for reinforcement of lightweight PC/ABS composites[J]. Applied Surface Science, 2018, 442: 124-137.
- [4] 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(1): 157-167.
- [6] BHUDOLIA S K, GOHEL G, KANTIPUDI J, et al. Ultrasonic welding of novel carbon/elium[®] thermoplastic composites with flat and integrated energy directors: lap shear characterisation and fractographic investigation [J]. Materials, 2020, 13 (7): 1634.
- [7] 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(2): 112-121.
- [8] 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: Applied Science and Manufacturing, 2014, 65: 27–37.
- [9] VILLEGAS I F. In situ monitoring of ultrasonic welding of thermoplastic composites through power and displacement data[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2015, 28(1): 66–85.
- [10] LEVY A, LE CORRE S, FERNANDEZ VILLEGAS I. Modeling of the heating phenomena in ultrasonic welding of thermoplastic composites with flat energy directors [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214 (7): 1361-1371.
- [11] 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(2): 203-214.
- [12] WANG K F, 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.
- [13] TAO W, SU X, WANG H 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.
- [14] 王晓林. 聚醚醚酮超声热-形变规律及焊接工艺研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2007.
- [15] ZHI Q, TAN X R, LU L, et al. Decomposition of ultrasonically welded carbon fiber/polyamide 66 and its effect on weld quality[J]. Welding in the World, 2017, 61(5); 1017-1028.
- [16] STOKES V K. Vibration welding of thermoplastics. Part II: analysis of the welding process [J]. Polymer Engineering & Science, 1988, 28(11): 728-739.
- [17] SOCIETY A W. Online inspection of weld quality in ultrasonic welding of carbon fiber/polyamide 66 without energy directors [J].
 Welding Journal, 2018, 97(3): 65-74.