

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.02.010

塑料组合构件高效超声波焊接的仿真与实验

杨庭飞, 朱永伟, 赵青青

(扬州大学机械工程学院, 江苏扬州 225127)

摘要: 运用 ANSYS 软件热力耦合模块, 建立尼龙材质塑料组合构件超声波焊接温度场参数化模型, 进行热力学分析与温度场模拟, 发现在焊接压力 400 N、超声振幅 30 μm 和焊接时间 0.5 s 下, 塑料组合构件有 0.2 mm 厚度的部分达到了 280℃, 发生了熔化。基于汽车电子驻车制动系统中的电机齿轮单元塑料组合构件的超声波焊接技术, 设计夹心式压电换能器、振幅增大装置等部件, 构建高效、可靠超声波焊接加工振动系统。以拉脱性能为指标进行焊接参数正交实验, 得到优化工艺参数组合为触发压力 560 N、焊接压力 800 N、焊接深度 0.75 mm, 相应的拉脱力达到 1 254 N, 验证了塑料组合构件超声波焊接方法的良好加工效果及固接可靠性。

关键词: 塑料组合构件; 超声波焊接; 焊接机理; ANSYS 分析; 正交实验

中图分类号: TG439.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)02-0052-07

Simulation and Experiment of High Efficiency Ultrasonic Welding of Plastic Combination Components

Yang Tingfei, Zhu Yongwei, Zhao Qingqing

(College of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract : The temperature field parametric model of ultrasonic welding for plastic combination components made of nylon was established by using the thermo-mechanical coupling module of ANSYS software, and the thermodynamics analysis and temperature field simulation were carried out. It is found that under the welding pressure of 400 N, the ultrasonic amplitude of 30 μm and the welding time of 0.5 s, the part with 0.2 mm thickness of the plastic combination components reaches 280℃ and melts. Based on ultrasonic welding technology of plastic combination components of motor gear unit used for automobile electrical park brake, the sandwich piezoelectric transducer and amplitude increasing device etc. were designed to construct an efficient and reliable ultrasonic welding vibration system. The orthogonal test of welding parameters was carried out on the basis of pulling out force as index, and the optimized process parameters are obtained as follows that trigger pressure is 560 N, welding pressure is 800 N and welding depth is 0.75 mm, the corresponding pulling out force can reach 1 254 N. The good processing effect and solid reliability of ultrasonic welding method for plastic combination components are verified.

Keywords : plastic combination component ; ultrasonic welding ; welding mechanism ; ANSYS analysis ; orthogonal test

随着汽车制造、航空航天和人工智能技术的快速发展,轻质塑料组合整体构件得到广泛应用,因此塑料组合构件之间的连接方式显得尤为关键。目前对于热塑性塑料组合构件,多采用机械连接、胶接等传统固接方式。机械连接通过几何形体嵌合实现固接,容易引起组合件上下松动,造成密封性不良、可靠性低等问题^[1-2];胶接需要额外表面处理并且在连接过程中用胶量不易控制,容易出现涂胶溢出

等问题,并且固化温度很难控制,较难满足塑料件连接效率及可靠性的要求。与传统的固接方式相比,超声波焊接是一种通过超声振动的焊接头将能量聚焦于待焊件,使接触面分子在热力耦合作用下快速融合在一起的加热固接方法,具有焊接密封性能好、可靠性高且不需要表面预先处理和后续清洁等优点^[3]。目前,对超声波塑料焊接技术的研究主要集中在微器件键合、复合材料接头性能探讨和界面组织分析

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51775484)

通讯作者: 朱永伟,教授,博士生导师,主要研究方向为机电系统设计与特种加工新技术 E-mail : ywzhu@yzu.edu

收稿日期: 2018-12-10

引用格式: 杨庭飞,朱永伟,赵青青. 塑料组合构件高效超声波焊接的仿真与实验 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(2) : 52-58.

Yang Tingfei, Zhu Yongwei, Zhao Qingqing. Simulation and experiment of high efficiency ultrasonic welding of plastic combination components[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(2) : 52-58.

等方面,但针对实际工程应用的中小型塑料组合构件如何获得高效、可靠的固接效果相关方面的研究报道较少^[4-5]。

笔者基于电子驻车制动系统中的电机齿轮单元外壳塑料组合构件^[6],运用 ANSYS 软件热力耦合模块建立超声波焊接温度场参数化模型,利用多物理场耦合功能进行热力学分析、温度场模拟^[7],探讨在一定的超声波焊接条件(振幅、压力、时间)下所能达到的焊接温度和熔化区域厚度,用以指导超声波焊接实验参数选择。

以有限元分析结果为依据设计夹心式压电换能器、振幅增大装置,构建高效可靠的超声波焊接振动系统,并通过激光微位移传感器进行焊接头超声振动性能测试,将其与模拟结果对比,验证超声波焊接系统研制的正确、可靠性。以拉脱力性能为评价标准,进行焊接参数正交实验^[8],得到优化工艺参数组合,通过实际超声波焊接加工,取得良好超声焊接效果,为中小型塑料组合整体构件固接加工提供一种高效、可靠的方法。

1 塑料组合构件超声波焊接仿真分析

目前在汽车制动系统中,电子驻车制动技术渐已成为市场的主流配置。作为电子驻车制动系统的电机,电机齿轮单元固接的可靠性对电子驻车制动系统的安全有效运行发挥着至关重要的作用。采用的研究对象为电子驻车制动系统中的电机齿轮单元外壳,如图 1 所示,其为尼龙 66 材质的塑料组合构件,分为上、下壳体,这两部分需通过超声波焊接固接在一起。

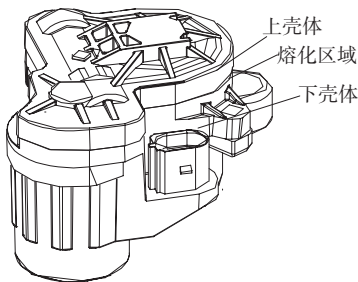


图 1 电机齿轮单元塑料组合构件示意图

对该塑料组合构件进行超声波焊接加工时,超声发生器将工频 50 Hz 交流电转换为 20 kHz 高频交流电并提供给夹心式压电换能器,夹心式压电换能器通过逆压电效应将来自于发生器的超声频电压转化为同频率的超声机械振动,通过振幅增大装置将振动幅度扩大,并将能量聚焦于塑料组合构件的上壳体,在机械振动的作用下,上壳体与下壳体的接

触面温度升高熔化,形成一定厚度的熔化层,焊接后保持压力,直到熔化层冷却凝固完成焊接。

1.1 超声波焊接热力学分析

电机齿轮单元塑料组合构件结构较为复杂,不利于热力学分析,考虑到构件大小和厚度将其简化成尺寸为 50 mm×50 mm×4 mm 的两块尼龙材质塑料壳体的上下耦合模型,该模型的上壳体表面受到焊接头传递的超声波纵向振动带来的交变应力和压力机施加的焊接压力,如图 2 所示,其中 F 为焊接压力, A 为超声波纵向振动位移(振幅)。

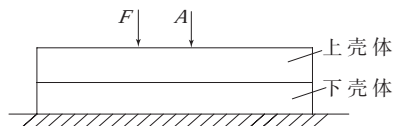


图 2 超声波焊接力学模型

塑料超声波焊接时每个循环周期产生的热量计算公式为^[9]:

$$Q = \int \delta d\epsilon = \int_0^{2\pi} [\sigma_0 \sin(\omega t + \delta)] d(\epsilon_0 \sin \omega t) = \pi E'' \epsilon_0^2 \quad (1)$$

式中: Q ——循环周期产生的热量;

δ ——相位角;

ϵ ——应变;

ω ——角频率;

σ_0 ——应力幅;

ϵ_0 ——每个周期内产生的应变幅;

t ——时间;

E'' ——损耗模量。

要求出塑料组合构件在超声波焊接中的 Q ,只需要求出在每个周期内的应变幅。在每个周期中,超声波纵向振动位移呈正弦交替变化,当其振幅值达到最大值时,焊接件的应变最大,此时通过计算可求得单个周期内的应变幅。运用 ANSYS 软件对上述的力学模型进行参数建模并对单周期的应变幅进行求解。求解过程中需要的尼龙 66 材料的物理参数见表 1。

表 1 材料的物理参数

材料	弹性模量 / MPa	泊松比	密度 / (kg·m ⁻³)
尼龙 66	2830	0.28	1140

对构件的下壳体施加 x, y, z 方向的固定约束,考虑到塑料构件的材质、大小,对上壳体施加焊接压力 $F=400$ N (0.16 MPa),超声振幅 $A=30$ μ m。经 ANSYS 仿真计算得到的模型整体应变分布如图 3 所示。

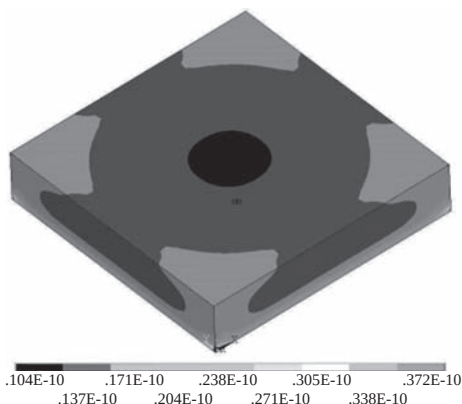


图3 模型的整体应变分布图

图3显示,焊接边缘处应变值最大,越靠近焊接边缘区域应变值越大。焊接边缘处的应变值最大会使表面材料最先在此处发生应力屈服,由此可以推断焊接件在受到拉伸时极易在焊接边缘处发生断裂。

对模型的中间区域内部应变分布情况进行进一步分析,选取模型表面中心点作为基准,提取沿厚度方向(Z轴方向)距离的应变分布曲线,如图4所示。图4显示,尼龙66塑料件最大应变(单周期的应变幅)发生在距离表面中心点4 mm处,此处为上下壳体的接触面,应变值为 1.33×10^{-11} m。

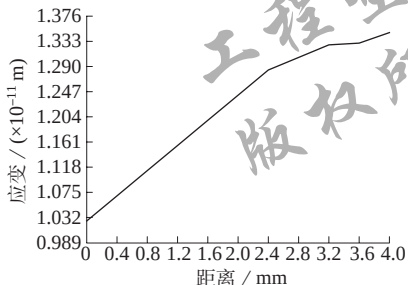


图4 表面中心点沿厚度方向距离的应变分布曲线图

1.2 温度场有限元模拟

进行温度场模拟之前,需要首先确定施加在焊接面的热量。在超声波焊接过程中,主要由超声波的机械能转换成塑料熔合的热能。在振动激励下,由于尼龙材料的响应黏弹效应和不良导热性能,最终使塑料组合构件产生热软化。稳态试验测试表明尼龙材料出现黏弹态(熔化)的温度为 230°C [10]。

在两片塑料的接触面上施加一定的热流密度,在焊接时间内的热流密度恒定不变。对于单片材料的热流作用如图5所示。

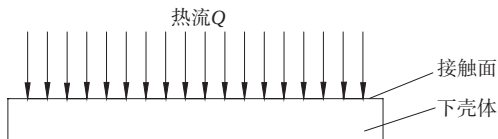


图5 下壳体热流示意图

施加在焊接件结合处的热流密度计算式为^[11]:

$$P = \frac{0.0308EfA^2}{Qb} \quad (2)$$

式中: P ——施加在塑料焊接面上的热流密度;

E ——弹性模量;

f ——超声波频率;

A ——焊接头振幅;

b ——塑料件厚度。

由式(1)、式(2)计算得到单位时间内热流密度为 $400\,000\text{ W/m}^2$ 。利用ANSYS软件进行瞬态温度场分析,对接触面施加恒定热流,其余表面都为绝热边界条件。分析过程中需要的尼龙66材料热学参数见表2。

表2 材料的热学参数

材料	比热容 / $[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$	导热系数 / $[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$
尼龙66	1700	0.35

设初始温度为 20°C ,焊接时间为 0.5 s ,最后经ANSYS仿真计算得到的超声波焊接温度场分布情况如图6所示。

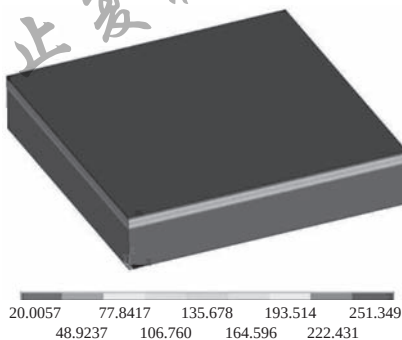


图6 超声波焊接温度场分布

从图6可以得到,热量在很短的时间内传递了很短的距离,最高温度处于上、下壳体接触区域,为 280°C ,并沿厚度方向(Z方向)温度不断降低。为进一步探讨温度的分布情况,以表面中心点处为基准,提取沿厚度方向(Z轴方向)温度变化传递曲线,如图7所示。

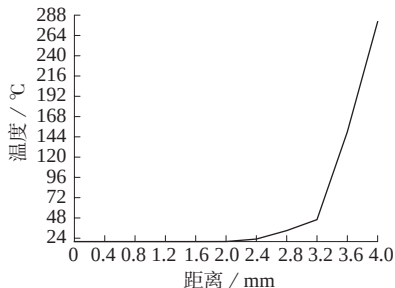


图7 温度变化曲线图

从图7可以得到,整个塑料件大约有 0.2 mm 厚度达到了尼龙66材料黏弹态(熔化)温度,如图

8所示,约占电机齿轮传动单元塑料组合构件所设计熔化区域厚度的70%。达到融化区域厚度要求。

熔化区域(厚度0.292 mm)

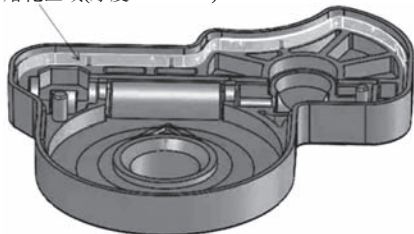


图8 设计的熔化区域厚度

对熔化区域上的点提取沿时间变化的温度曲线,如图9所示。由图9可以看出,在0.4 s时热流施加面达到了塑料可以软化的温度,0.5 s时达到最高温度280℃,表明此时塑料件表面发生一定程度的分解。实际焊接时此温度下表面为棕褐色,表明温度场模拟的结果比较接近实际情况。

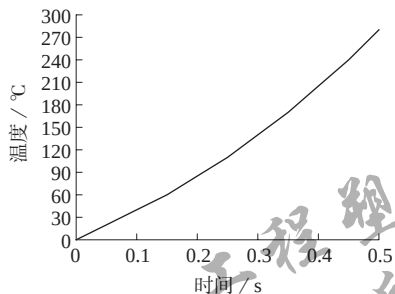


图9 熔化区域点温度随时间变化曲线

1.3 塑料组合构件超声波焊接过程

根据上述分析,超声波焊接塑料组合构件的过程可分成四个阶段:塑料生热、熔化、熔合、冷却凝固^[12],如图10所示。

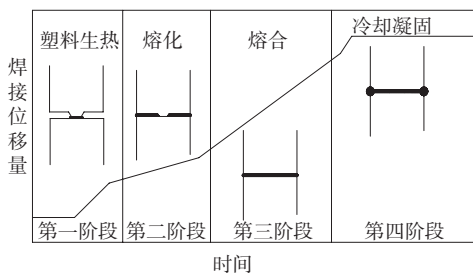


图10 超声波焊接过程示意图

第一阶段:焊接头与塑料组合构件上壳体接触,达到触发压力400 N,超声波焊接振动系统开始振动,将超声能量聚焦于上壳体,接触面产生形变,分子间开始摩擦发热,塑料件开始熔化。

第二阶段:由于焊接压力的增加,发热熔化速度加快,0.4 s后达到尼龙材料的黏弹态(熔化)温度230℃,产生的热量使塑料件一部分发生熔化,而使另一部分的温度继续升高。

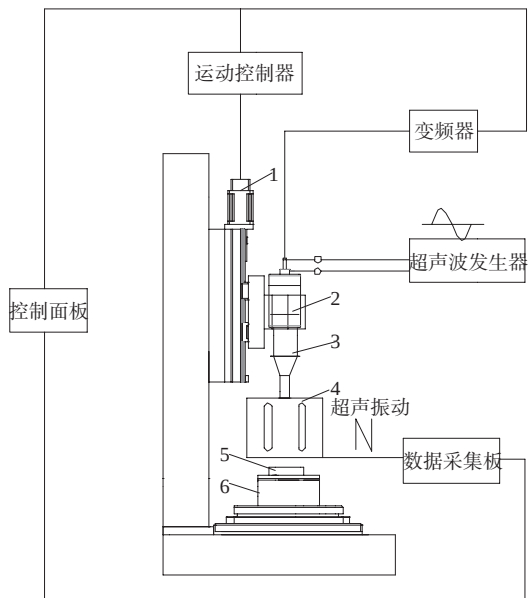
第三阶段:熔化层的厚度保持不变,随着恒温分布呈现稳态熔化。0.5 s后,加工区域可能达到280℃,塑料件大约有0.2 mm厚度的部位发生熔化,约占熔化区域厚度的70%。

第四阶段:超声振动停止,但压力仍然保持,上下壳体接触面得到充分接触,整个熔化层冷却凝固,并产生分子间的扩散,焊接结束。

2 塑料组合构件超声波焊接系统构建

2.1 超声波焊接加工系统设计

针对电机齿轮单元塑料组合构件,设计的超声波焊接加工系统如图11所示,其包括升降气缸、换能器、振幅增大杆、焊接工具头、塑料构件、装卡装置等。换能器采用转换效率高的夹心式压电换能器;振幅增大杆根据焊接振幅的需求,采用加工简单且放大系数大的圆锥过渡复合型振幅增大杆,焊接工具头端部制作成与塑料件组合构件上壳体轮廓相匹配的型材;装卡装置的夹持部分,制作成与塑料件组合构件下壳体轮廓相互贴合的形腔。换能器、振幅增大杆和焊接工具头从上到下依次通过双头螺栓连接;装卡装置则通过螺栓固定在超声波焊接头下方支架上,且中心面与振幅增大装置的中心面在同一平面上。整个系统为数字式超声振动系统,能够自动跟踪,并保持共振状态。



1—升降气缸;2—夹心方式压电换能器;3—振幅增大杆;

4—焊接工具头;5—塑料组合构件;6—装卡装置

图11 超声波焊接塑料加工系统示意图

超声波焊接振动系统换能器的设计决定了整个振动系统的振动性能,其包含超声换能器与振幅增大装置的最佳耦合。为了满足塑料组合构件超声

波焊接振动系统的需求,选用能在低频超声端工作且机电转换效率高的夹心式压电换能器^[13],其示意图如图 12 所示。

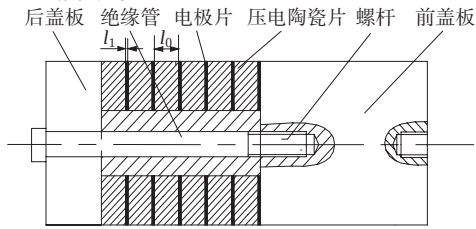


图 12 夹心式压电换能器

夹心式压电换能器要求功率能在 0~1 500 W 范围内调节,施加 200 V 的激励电压谐振频率约 20 kHz 时,换能器端面输出振幅达到 5~10 μm。

超声波焊接过程中,夹心式压电换能器输出的振幅远低于实际焊接的要求,必须借助振幅增大装置将振幅进行放大,根据焊接振幅的需求,上端采用加工简单且放大系数大的圆锥过渡复合型振幅增大杆^[14]、下端为超声波焊接头,焊接头的端部必须做成匹配塑料件轮廓的型材。振幅扩大杆与焊接头通过过盈配合相互连接,如图 13 所示。

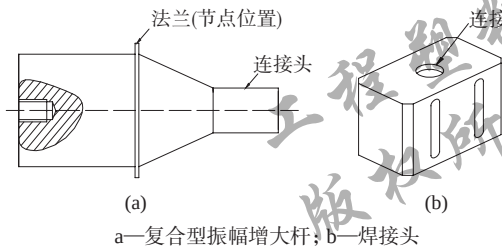


图 13 振幅增大装置

2.2 振动特性测试

采用激光位移传感器对构建后的超声波焊接加工系统进行振动特性测试^[15]。验证所设计的焊接工具头端面振幅是否达到焊接需求。振动特性测试设备如图 14 所示,振幅测试结果如图 15 所示。由图 15 可以看出,测得所设计构建的超声波焊接振动系统焊接头端面振幅约为 31.2 μm,符合热力学分析条件,满足尼龙材质塑料组合构件超声波焊接振幅需求。

3 塑料组合构件超声波焊接实验分析

通过热力学和温度场分析得到在振幅 30 μm、焊接压力 400 N、焊接时间 0.5 s 的条件下可以达到电机齿轮单元整体构件的焊接温度。在振幅、时间确定的情况下塑料组合构件的焊接质量与触发压力、焊接压力和焊接深度有关。触发压力过小会使工件结合面不易紧贴,造成熔化不均匀现象;触发压力过高,会使结合面过度挤压发生破裂。焊接压

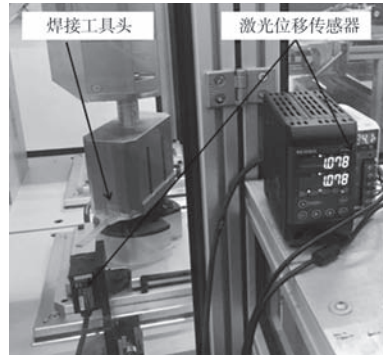


图 14 振动特性测试设备

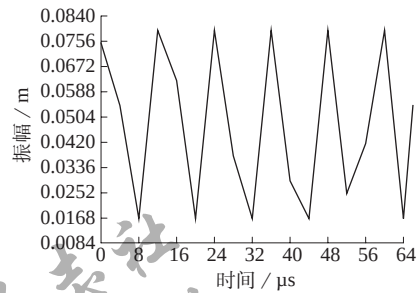


图 15 振幅测试结果

力过小会影响热力耦合效果降低固接性能;焊接压力过大则会导致焊接过量造成焊接面老化。焊接深度过低,会使熔化量少引起焊接不牢固;焊接深度过高时,影响焊接件的内部机构导致焊接件报废。为进一步探讨触发压力、焊接压力和焊接深度对焊接质量的影响,采用正交实验的方法进行分析。

根据前期研究,在满足结合面贴合且不发生待焊件被挤压破裂的情况下,从因素触发压力、焊接压力和焊接深度各选取三个水平,见表 3。

表 3 因素水平表

水 平	因 素		
	触发压力 / N	焊接压力 / N	焊接深度 / mm
1	400	750	0.70
2	450	800	0.75
3	500	850	0.80

选取不同水平组合成 9 组数据,进行焊接试验,超声波焊接加工设备实物图如图 16 所示。

在固接技术中,固接强度是衡量固接质量的技

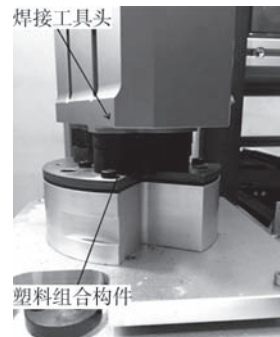
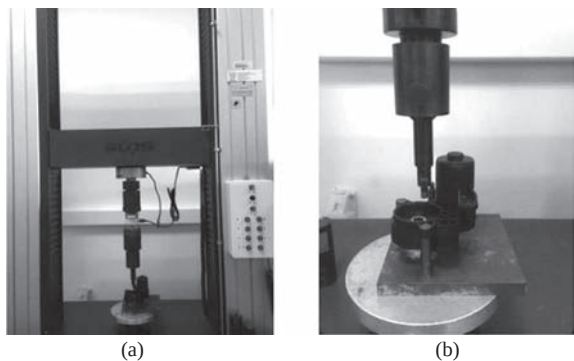


图 16 超声波焊接加工设备实物图

术指标,如果固接强度小则会造成塑料组合构件密封性能差,导致失效。只有较大的固接强度,才能保证产品的成品率和质量。拉脱力测试是验证固接强度的主要方法,拉脱力测试如图 17 所示。正交实验方案及相应的拉脱力测试数据见表 4。



a—测试整体图; b—测试局部图

图 17 拉脱力测试

表 4 正交实验方案及相应拉脱力测试数据

触发压力水平	焊接压力水平	焊接深度水平	拉脱力 / N
1	1	1	243
1	2	2	960
1	3	3	854
2	1	2	819
2	2	3	813
2	3	1	631
3	1	3	633
3	2	1	1080
3	3	2	792

对所测得的拉脱力进行数据处理,发现基本符合正态分布规律。对实验数据进行极差计算,结果见表 5。

表 5 极差分析表

项 目	触发压力	焊接压力	焊接深度
K1	2 057	1 695	1 954
K2	2 263	2 853	2 571
K2	2 505	2 277	2 300
极差 R	149.3	386.0	205.6

从表 5 可以看出,焊接压力极差最大,焊接深度极差次之,触发压力的极差最小。表明三个因素中,对焊接后拉脱性能影响最大的是焊接压力,然后是焊接深度,最后是触发压力。最佳的工艺参数组合是触发压力 500 N,焊接压力 800 N,焊接深度 0.75 mm。

从表 5 还可以看出,拉脱力均随焊接压力和焊接深度的增加而先上升后下降,但随触发压力的增加一直呈现上升趋势,表明继续提高触发压力有可能还会继续提高拉脱力,但也可能会导致焊接件被破坏。为了进一步研究触发压力的影响,固定焊接压力 800 N、焊接深度 0.75 mm,继续增加触发压力

作进一步实验,发现当触发压力不高于 590 N 时,焊接件结合面亦未出现挤压破坏,故将触发压力讨论范围限定在 500~590 N,所得结果如图 18 所示。

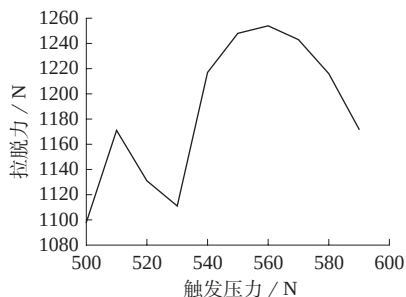


图 18 触发压力增至 500 N 后与拉脱力关系

由图 18 可知,触发压力为 560 N 时,拉脱力达到最大值 1254 N。最终获得的超声焊接电机齿轮单元塑料组合构件的最佳工艺参数组合为:触发压力 560 N,焊接压力 800 N,焊接深度 0.75 mm。对此焊接参数下焊接后的未熔化部分厚度进行测量,如图 19 所示。

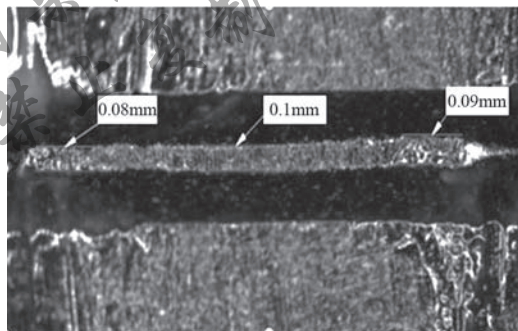


图 19 焊接效果图

由图 19 可以看出,未熔化部分厚度约为 0.1 mm,即约有 0.2 mm 厚度的部分发生熔化,这与有限元分析结果接近,且达到所设计厚度的 70%,表明在优化后的焊接参数下可以取得良好焊接效果,且焊接时间短、焊缝融化均匀。

4 结论

(1) 对 4 mm 尼龙材质的塑料组合构件进行热力学分析和温度场模拟,发现在焊接压力 400 N、超声振幅 30 μm 和焊接时间 0.5 s 作用下,塑料组合构件有 0.2 mm 的部分发生了熔化。

(2) 基于电机齿轮单元塑料组合构件的超声波焊接技术,设计了夹心式压电换能器及振幅增大装置等部件,构建了高效、可靠的超声波焊接加工振动系统。

(3) 以拉脱力为评价标准,进行正交实验,进一步探究触发压力、焊接压力、焊接深度对塑料组合构件焊接质量的影响,得到优化工艺参数组合为触发

压力 560 N、焊接压力 800 N、焊接深度 0.75 mm,该工艺参数组合下能使电机齿轮单元塑料组合构件的拉脱力达到 1 254 N。

参考文献

- [1] 陈林山,陈翔. 塑料与复合材料在汽车轻量化设计中的应用[J]. 塑料工业,2017,45(7):103-106.
Chen Linshan, Chen Xiang. Application of plastics and composite materials in lightweight design of automobile[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(7):103-106.
- [2] Gay A, Lefebvre F, Bergamo S, et al. Fatigue performance of a self-piercing rivet joint between aluminum and glass fiber reinforced thermoplastic composite[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 83(4):127-134.
- [3] 乔海涛,梁滨,张军营,等. 先进复合材料结构胶接体系的研发与应用[J]. 材料工程,2018,46(12):38-47.
Qiao Haitao, Liang Bin, Zhang Junying, et al. Development and application of adhesive materials for advanced composite bonding[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46 (12):38-47.
- [4] 许志武,李政玮,刘建光,等. C₁/PPS 复合材料辐射预热超声焊接工艺及其接头断裂分析[J]. 焊接学报,2017,38(3):121-124.
Xu Zhiwu, Li Zhengwei, Liu Jianguang, et al. Ultrasonic welding process of C₁/PPS with thermal radiant preheating and the fracture of welded joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(3):121-124.
- [5] 黎晓贞,黄华幅,邹文生,等. 超声波焊接技术在继电器塑料壳体连接中的应用[J]. 塑料工业,2018,46(11):115-118.
Li Xiaozhen, Huang Huafu, Zou Wensheng, et al. Application of ultrasonic welding technology in relay plastic shell connection[J]. China Plastics Industry, 2018, 46 (11):115-118.
- [6] 季梅霞,过学讯. 基于 LuGre 摩擦模型的车轮驻车制动系统研究[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2015,39(2):393-397.
Ji Meixia, Guo Xuexun. Research on electrical parking brake system based on LuGre friction model[J]. Journal of Wuhan University of Technology:Transportation Science & Engineering, 2015, 39(2):393-397.
- [7] 楚拯中,苏楚奇. 通风盘式制动器热力耦合分析[J]. 武汉理工大学学报:信息与管理工程版,2015,37(4):440-443.
Chu Zhengzhong, Su Chuqi. Thermo-mechanical coupled analysis of ventilated disk brake[J]. Journal of Wuhan University of Technology:Information & Management Engineering, 2015, 37 (4):440-443.
- [8] 赵玉津,陈瑶,罗震,等. 铝铜超声波焊接接头性能的正交试验分析[J]. 天津大学学报,2018,7(7):735-740.
Zhao Yujin, Chen Yao, Luo Zhen, et al. Analysis of orthogonal test of properties of aluminum / copper ultrasonic metal welded joints[J]. Journal of Tianjin University, 2018, 7 (7):735-740.
- [9] 李玉龙,刘达繁,茶映鹏,等. 6061 铝合金超声波点焊温度场数值模拟及试验[J]. 焊接学报,2017,38(4):13-16.
Li Yulong, Liu Dafang, Cha Yingpeng, et al. Simulation and experiments of ultrasonic welding temperature field of 6061 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(4):13-16.
- [10] 张振强,张宗波,罗怡,等. 超声波焊接粘弹性热的仿真计算[J]. 焊接学报,2009,30(9):97-100.
Zhang Zhenqiang, Zhang Zongbo, Luo Yi, et al. Simulation of viscoelastic heat during ultrasonic welding of thermoplastics[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30 (9):97-100.
- [11] 胡孝迎,郑强,刘典新,等. 环氧树脂改性低熔点尼龙 6 复合材料的结晶行为与流变性能[J]. 高分子材料科学与工程,2016, 32(8):69-74.
Hu Xiaoying, Zheng Qiang, Liu Dianxin, et al. Crystallization and rheological behavior of epoxy resin modified the low melting point of nylon 6[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2016, 32(8):69-74.
- [12] Palardy G, Villegas I F. On the effect of flat energy directors thickness on heat generation during ultrasonic welding of thermoplastic composite[J]. Composite Interfaces, 2017, 24(2):203-214.
- [13] 杨大师,顾翔,王芳,等. 超声调制电加工系统换能器的特性分析与研究[J]. 压电与声光,2016,38(3):469-474.
Yang Dashi, Gu Xiang, Wang Fang, et al. Study and characteristics of piezoelectric transducer for ultrasound-modulated electric machining system[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2016, 38 (3):469-474.
- [14] 马付建,康仁科,董志刚,等. 带中心孔的复合超声变幅杆设计及性能分析[J]. 机械设计,2015,32(6):51-55.
Ma Fujian, Kang Renke, Dong Zhigang, et al. Design and analysis on composite ultrasonic horn with central hole[J]. Journal of Machine Design, 2015, 32(6):51-55.
- [15] 邵建,王芳,邓正泉,等. 超声调制电加工振动系统工具优化及实验[J]. 宇航材料工艺,2014,44(5):41-45.
Shao Jian, Wang Fang, Deng Zhengquan, et al. Optimal design and experiments of ultrasound-modulated electric machining system[J]. Aerospace Materials & Technology, 2014, 44(5):41-45.