

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.10.015

一种兆赫频超声塑料焊接振子的研究

杨文鹏,何勃,温智益,郭栋

(辽宁工业大学机械工程与自动化学院,辽宁锦州 121001)

摘要:依据声学理论设计制作了一种声学匹配层结构的兆赫级高频超声塑料焊接振子,提出了一种兆赫频超声塑料焊接方法。采用有限元方法对兆赫频超声焊接振子进行了优化,以提高电-机转化效率从而使能量高效地用于焊接。对所研制的兆赫频超声焊接振子进行了振动测试,结果表明,焊接振子的有限元分析结果与实验测试结果较吻合,兆赫频焊接振子负载性能具有一定的稳定性。使用该兆赫频焊接振子对厚度 0.25 mm 的聚氯乙烯两层薄板进行了焊接实验,在功率为 30 W 的工况下即可实现较好的焊接强度,且表面质量较好,为兆赫级高频超声塑料焊接技术的发展提供了理论与应用基础。

关键词:塑料焊接;超声焊接振子;兆赫频;声学匹配层

中图分类号: TG 439.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)10-0080-05

Research on an Ultrasonic Plastic Welding Vibrator at Megahertz Frequency Level

Yang Wenpeng, He Qing, Wen Zhiyi, Guo Dong

(Department of Mechanical Engineering and Automation, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract : According to the acoustic theory, a high frequency ultrasonic plastic welding vibrator at megahertz level with acoustic matching layer was designed and made. A method of ultrasonic plastic welding with megahertz frequency was proposed. The finite element method was used to optimize the megasonic welding vibrator in order to improve conversion efficiency of the electrical energy-mechanical energy and enable the energy to weld efficiently. The vibration test of the welding vibrator was carried out. The results show that the finite element analysis results of the welding vibrator are in good agreement with the experimental results and its load performance is stable. The welding experiments were conducted under the condition of 30 W power, and good welding strengthen and surface quality for two lapped 0.25 mm thick PVC sheets were achieved, which provides a theoretical and practical basis for the development of high frequency megasonic plastic welding technology.

Keywords : plastic welding ; ultrasonic welding vibrator ; megahertz frequency ; acoustic matching layer

超声焊接自 20 世纪 50 年代被偶然发现以来,因其具有焊接时间短、不需焊剂与外部加热装置、焊接强度高等诸多优点,已迅速成为一种节能环保的重要连接方法^[1-4]。超声焊接也是塑料制品目前常用的连接方法,广泛应用于电子、文具、食品、化妆等行业^[5-7]。随着应用需求的不断多样化,需要微型化的超声焊接装置来满足不同的应用场合,但传统的低频超声焊接设备一般采用螺栓紧固式的朗之万纵向换能器,该类换能器与焊接工具的组件包含节点

位置的支承法兰以及放大振幅用的变幅杆^[8-9],焊接设备难免体积庞大,不易方便灵活地附加到超声焊接的特需场合。近年来,有关学者提出将高频超声振动引入超声焊接工艺,研究表明^[10-11]:利用高频超声振动可改善超声焊接特性,如增大焊接强度、扩大焊接面积、获得更高的温升速度等。K. Naruse 等^[12]研制了一种兆赫频表面行波焊接装置,小振幅可避免焊接件损伤,但该装置存在结构复杂、制作成本高、焊接时间长等问题。

基金项目: 辽宁省科学技术计划项目 (2015020159)

通讯作者: 何勃,博士,教授,主要研究方向为压电驱动与控制、特种加工技术 E-mail: qinghe118@sina.com

收稿日期: 2019-07-20

引用格式: 杨文鹏,何勃,温智益,等. 一种兆赫频超声塑料焊接振子的研究 [J]. 工程塑料应用,2019,47(10):80-84.

Yang Wenpeng, He Qing, Wen Zhiyi, et al. Research on an ultrasonic plastic welding vibrator at megahertz frequency level[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(10):80-84.

现有的超声焊接机理表明,超声焊接装置所提供的能量与焊接振子的振动频率以及振动幅值的平方成正比^[13],因此在所需能量相同的情况下,高频超声焊接需要的振幅可以更小。笔者依据声传播的基本理论并利用有限元分析软件,针对聚氯乙烯(PVC)等聚合物薄板的焊接,探讨兆赫频超声焊接振子的理论与应用问题。

1 声学匹配层兆赫频超声焊接振子的设计

声学匹配层指压电陶瓷元件与焊接件两种声阻抗率不同的介质之间置入的一层声阻抗过渡的匹配材料。焊接振子采用声学匹配层结构,可以提高焊接振子的电-声转化效率进而使能量高效地传输至焊接界面。利用有限元软件对兆赫频超声焊接振子的结构尺寸进行了优选,使振子能量高效地聚集在焊接工作面,并避免振子其它部位振动幅值过大导致能量过多损耗。所研制的含声学匹配层结构的兆赫频超声焊接振子(桶形)如图1所示。压电陶瓷圆片厚度方向伸缩振动产生的兆赫频超声波传输至超声焊接界面时,需透过声学匹配层与上焊接件两层介质,其声波传播的模型如图2所示。



图1 匹配层结构兆声焊接振子

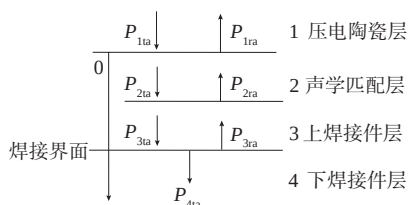


图2 声波透射模型

入射声波能量传输至超声焊接界面的效率用声透射系数表征,其声透射系数 t 可按式(1)、式(2)计算^[14]。

$$t = \left| \frac{P_{4ta}}{P_{1ta}} \right|^2 \cdot \frac{R_1}{R_4} = \left| \frac{1}{T_{11}} \right|^2 \cdot \frac{R_1}{R_4} \quad (1)$$

$$T_{11} = \frac{1}{8} \left[\left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \left(1 + \frac{R_2}{R_3} \right) e^{ik_2 d_2} + \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right) \left(1 - \frac{R_2}{R_3} \right) e^{-ik_2 d_2} \right] \left(1 + \frac{R_3}{R_4} \right) e^{ik_3 d_3} + \frac{1}{8} \left[\left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \left(1 - \frac{R_2}{R_3} \right) e^{ik_2 d_2} + \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right) \left(1 + \frac{R_2}{R_3} \right) e^{-ik_2 d_2} \right] \left(1 - \frac{R_3}{R_4} \right) e^{-ik_3 d_3} \quad (2)$$

式中: P_{1ta} ——压电陶瓷片的发射声压幅值;

P_{4ta} ——声波透射到下焊接件的声压幅值;

R_i ——第 i 层介质声特性阻抗;

k_i ——第 i 层介质波数;

d_i ——第 i 层介质厚度。

为了达到最好的声波传输效果即获得较大的声透射系数,选择四元系的PZT-4压电陶瓷作为声发射元件,该压电陶瓷元件的直径为20 mm,厚度为1.2 mm,厚度振动频率约为1.7 MHz。为了获得较高的声透射强度,选用铝合金作为声学匹配层材料^[15]。被焊接件的厚度为0.25 mm。将确定好的参数值带入(1)式,对铝合金声学匹配层厚度进行计算,绘制出不同声学匹配层厚度与波长比值(d_2/λ_2)时的声透射系数曲线,如图3所示。

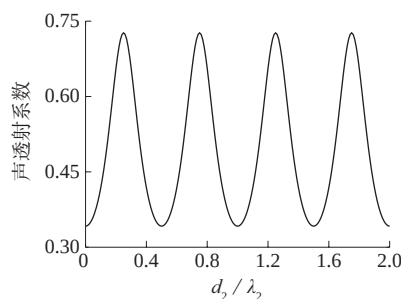


图3 焊接振子声透射系数曲线

声透射系数极大值出现在 $d_2/\lambda_2=0.25+0.5n$, $n=0,1,2,3\cdots$,此时声透射系数 $t=0.7268$ 。依此可以确定声学匹配层厚度,使超声波到达焊接界面有较强的声辐射,提高电-声转化效率。

2 兆赫频超声焊接振子外围尺寸的有限元优化

在声学匹配层厚度确定的条件下,采用有限元法对兆赫频超声焊接振子的外围尺寸进行仿真分析,优选出振动模态,使电-机转换效率最高。采用有限元法对兆赫频超声焊接振子进行谐响应分析。为提高计算效率以及精确度,采用映射网格划分。有限元三维实体模型如图4所示。压电陶瓷元件厚度振动的频率约为1.7 MHz,焊接振子谐响应分析

频域范围选为 1 600 ~ 1 800 kHz, 谐响应曲线如图 5 所示。在匹配层厚度确定的条件下, 改变超声焊接头凸台高度, 可以对焊接振子的振动幅值以及振动模态进行优选, 对凸台的高度选择不同尺寸进行谐响应分析, 凸台结构如图 6 所示。

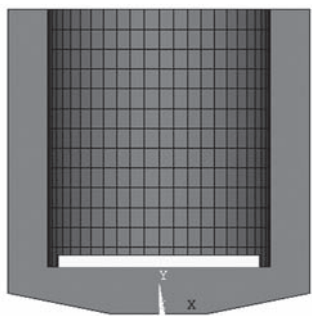


图4 焊接振子有限元三维模型

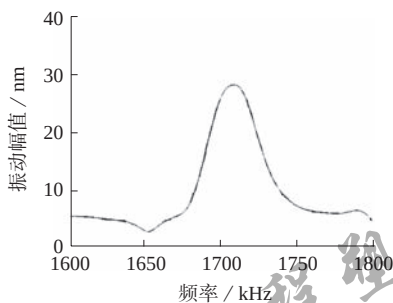


图5 焊接头中心点频幅曲线

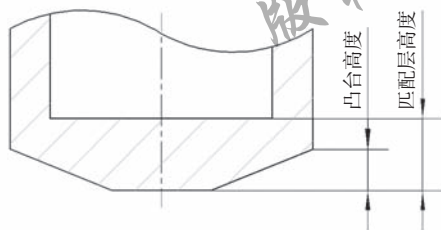


图6 焊接振子凸台示意图

对不同结构尺寸的焊接振子施加 5 V 的激励电压进行谐响应分析, 提取不同凸台高度的焊接头工作面在同一条直径的振动幅值, 其结果如图 7 所示。该优化方式, 既保证声透射系数最大, 又能获得大的振动幅值, 使能量高效地用于超声焊接。根据图 7 可以优选出振动幅值较大的结构尺寸, 完成振子的加工制作。

3 兆赫频超声焊接振子的实验结果

加工制作的兆赫频超声焊接振子的剖视图如图 8 所示。在焊接过程中, 压电陶瓷元件由于逆压电效应产生兆赫频超声波, 超声波透过铝合金焊接

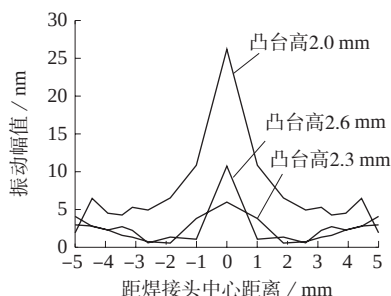


图7 不同凸台高度的振幅分布图

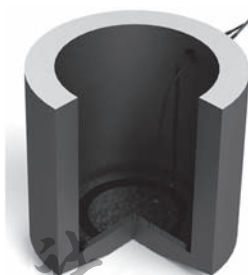


图8 焊接振子剖视图

头以及焊接件两层中间匹配层进而抵达焊接界面, 焊接头须保证平面度以及表面粗糙度的加工质量要求, 防止加工误差致使焊接头与焊接件不能紧密贴合, 影响焊接质量。

利用多普勒激光测振仪对焊接振子进行振动幅值测试, 测试系统如图 9 所示。

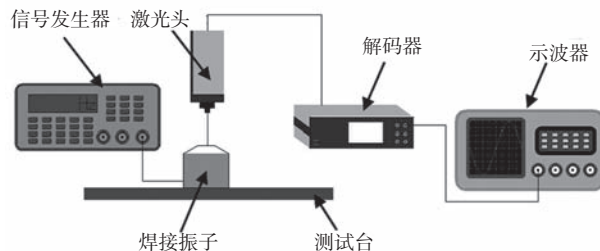


图9 测试系统

信号发生器配以相应频率的 5 V 测试交流电信号, 在焊接振子的焊接头四条半径上取点测试, 每条半径取测点间隔为 0.5 mm 的 11 个测量点, 从 A0, B0, C0, D0 分别向焊接头中心进行测量。测点位置如图 10 所示。对四条半径上的同一圆周的测量点取平均值, 可得振动幅值分布如图 11 所示。由图 11 可知, 超声焊接振子的实测振动幅值与有限元仿真的振幅分布曲线基本吻合。

图 12 为焊接振子工作面在更多测点条件下的振幅分布情况。测试过程中对焊接振子施加 50 V 正弦交流信号的工作电压, 测试焊接振子工作面的

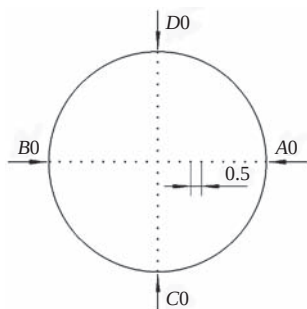


图 10 焊接振子头测点位置

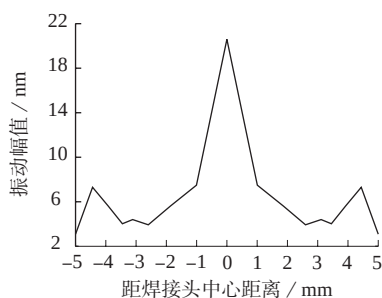
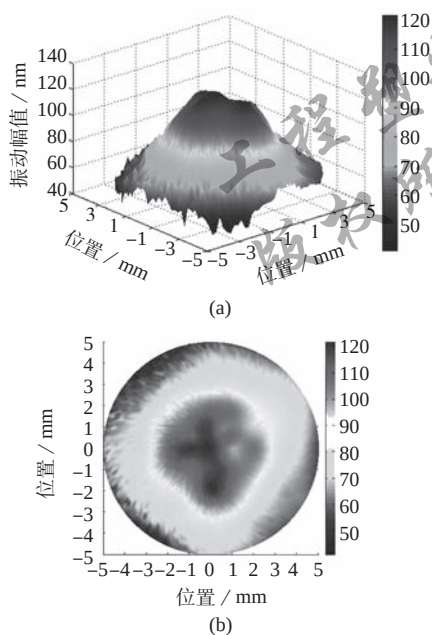


图 11 焊接振子实测振幅分布图



a—振幅分布等轴视图；b—振幅分布俯视图

图 12 焊接振子工作面振幅云图

振幅。测点间距为 1 mm,对焊接振子工作面的整个圆周每 15° 选取一条半径。

为全面分析焊接振子非工作平面的振动情况,对兆赫频超声焊接振子的振子壁亦进行了振幅测试(加载工况与图 12 相同),测试方案如图 13 所示。测点间距为 1 mm,从焊接振子的顶端 0 点沿着振子壁进行测试。焊接振子壁的振幅分布结果如图

14 所示。由图 14 可知,兆赫频超声焊接振子壁的振幅最大值小于 12 nm,即不到焊接振子工作面振幅的 1/10,故所选的焊接振子工作模式较为理想,有效地避免了非工作面振幅过大导致的能量过多损耗。

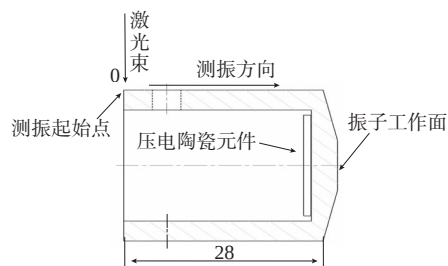


图 13 振子壁测试方案

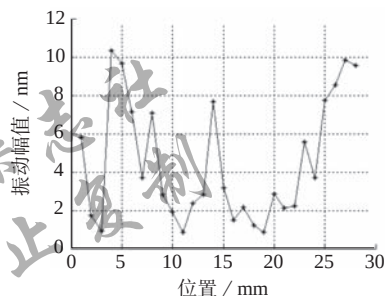


图 14 振子壁振幅分布

在实际焊接工作中需要对焊接振子施加载荷。为探究兆赫频超声焊接振子负载性能的稳定性,对研制的兆赫频超声焊接振子在空载情况下以及施加 10、25、40、70 N 载荷情况下进行了振动测试,振动幅值都基本保持在 0.1 μm ,表现出兆赫频超声焊接振子负载性能的稳定性。

应用所研制的兆赫频超声焊接振子进行了焊接实验,焊接材料为厚度 0.25 mm 的 PVC 薄板,两板焊接件采用搭接形式。在电功率 30 W 的工况下,对焊接振子依次施加 35、45、65、85、115 N 的压力,焊接时间分别为 19、12、8、5、4 s,实现了较好的焊接强度,且表面质量较好。

4 结论

(1) 针对 PVC 等聚合物薄板塑料,提出了一种兆赫频的超声焊接方法。

(2) 根据声学理论对焊接振子的声能辐射效率进行了理论分析,在满足声学匹配的前提下,利用有限元软件对兆赫级高频超声塑料焊接振子的结构尺寸进行了优选,提高了电-声以及电-机转化效率,使能量高效地用于超声焊接。

(3) 兆赫频超声焊接振子在载荷作用下振动幅

值几乎不受影响,表现出兆赫频超声焊接振子负载性能的稳定性。

(4) 焊接实验表明,兆赫级高频超声塑料焊接振子对厚度为 0.25 mm 的 PVC 薄板能有效焊接,具有较好的焊接强度,且表面质量较好。

参考文献

- [1] 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):56-62.
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):56-62.
- [2] 张玉坤. 塑料焊接在汽车灯具中的应用及其影响因素探究[J]. 合成材料老化与应用,2019(2):139-143.
Zhang Yukun. Study about the application of plastic welding on automobile lamps and its influencing factors[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2019(2):139-143.
- [3] 王乐积,潘延训,王本孝. 塑料制件的超声波焊接技术[J]. 工程塑料应用,1993,21(4):30-33.
Wang Leji, Pan Yanxun, Wang Benxiao. Ultrasonic welding technology for plastic parts[J]. Engineering Plastics Application, 1993,21(4):30-33.
- [4] 张宗波,罗怡,王晓东,等. 塑料超声波焊接及其用于聚合物 MEMS 器件键合的研究进展[J]. 焊接,2008(8):9-15.
Zhang Zongbo, Luoyi, Wang Xiaodong, et al. Research progress of ultrasonic welding of plastics and its application to bonding of polymer MEMS devices[J]. Welding, 2008(8):9-15.
- [5] 车敏,张林龙. 连接器产品的超声波塑料焊接结构设计[J]. 机电产品开发与创新,2018(1):58-60.
Che Min, Zhang Linlong. Plastic ultrasonic welding line design of connectors[J]. Electromechanical Product Development and Innovation, 2018(1):58-60.
- [6] 郑景润. 基于包装机械的超声焊接技术研究及应用[J]. 包装与食品机械,2014(5):53-57.
Zheng Jingrun. Power ultrasonic welding system based on packing machine[J]. Packaging and Food Machinery, 2014(5):53-57.
- [7] 黎晓贞,黄华福,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):123-126.
Li Xiaozhen, Huang Huafu, Zhou Wensheng, et al. Application of ultrasonic welding technology in relay plastic housing connection[J]. Plastics Industry, 2018,46(11):123-126.
- [8] Hongoh M, Yoshikuni M, Miura H, et al. Configuration of a 30-mm-diameter 94 kHz ultrasonic longitudinal vibration system for plastic welding[C]// IEEE Symposium on Ultrasonics, 2004.
- [9] Tsujino J, Hongoh M, Tanaka R, et al. Ultrasonic plastic welding using fundamental and higher resonance frequencies[J]. Ultrasonics, 2002,40(1):375-378.
- [10] Tsujino J, Hongoh M, Yoshikuni M, et al. Frequency characteristics of ultrasonic plastic welding[J]. JSME International Journal Series C, 2006,49(3):634-641.
- [11] Hongoh M, Miura H, Ueoka T, et al. Temperature rise and welding characteristics of various-frequency ultrasonic plastic welding systems[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2006, 45(5S):4806.
- [12] Naruse K, Watanabe Y. Ultrasonic plastic welding at 1.2 MHz using a surface acoustic wave device[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2006, 45(5S):4812.
- [13] 杨士勤,阎久春. 超声波塑料焊机的能量控制模式[J]. 焊接学报,1995(2):118-123.
Yang Shiqin, Yan Jiuchun. Energy-controlled mode of ultrasonic plastic welder[J]. Transactions of the China Welding Institution 1995(2):118-123.
- [14] 李珺,贺西平,张峰,等. 换能器双匹配层参数的计算[J]. 传感器与微系统,2008,27(12):106-108.
Li Jun, He Xiping, Zhang Feng, et al. Parameters calculation of acoustical matching layers of Ultrasonic transducers[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008, 27(12):106-108.
- [15] 何勃,翟科,李亮,等. 一种兆赫频超声抛光振子的设计与研究[J]. 机械设计与制造,2018(1):118-121.
He Qing, Zhai Ke, Li Liang, et al. Research and design of a high frequency megasonic piezoelectric polishing vibrator[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2018(1):118-121.

中沙(天津)石化有限公司 26 万 t/a PC 项目施工

中石化四建公司承建的中沙(天津)石化有限公司 26 万 t/a 聚碳酸酯(PC)项目静设备储罐安装工程开工,并掀起新的施工高潮。中沙 PC 项目从国外引进工艺技术,采用 SABIC 创新塑料非光气法技术,在铜基催化剂存在下,将碳

酸二苯酯与双酚 A 熔融状态下聚合生成 PC,该工艺技术先进,大大降低了物耗和能耗。相应的先进工艺对反应设备也有严苛的要求。项目承担了 20 多台不同容积的立式圆筒形钢制成品油罐。由于储罐容积的大小不一,对施工和工机具上加大了难度。
(芳烃烯烃产业观察)