

塑料超声波焊接质量影响因素的研究进展

高 阳 陈风波 赵云峰

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 从焊接材料、工艺参数、焊接面连接形式等方面综述了塑料超声波焊接对焊接质量的影响规律。低熔点、高表面摩擦系数的材料容易进行焊接,焊接质量主要受焊接时间、压力等因素的影响,导能筋及连接层的引入有利于提高焊接质量,并指出了塑料超声波焊接的发展方向。

关键词 超声波焊接,焊接质量,塑料

Research on Factors Affecting Quality of Ultrasonically Welded Plastic

Gao Yang Chen Fengbo Zhao Yunfeng

(Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract The paper introduces technique of ultrasonic plastic welding. Factors of welding quality include materials of welding, parameters of processing, interfacial shape of welding and so on. The materials that have low melting point and high external frictional coefficient are easy to weld. Primary parameters affecting welding quality are welding time, welding pressure, amplitude etc. Energy director or tie-layer materials are used to improve welding quality. In addition, the future development of ultrasonic welding technique in plastic field is pointed out.

Key words Ultrasonic welding, Welding quality, Plastic

1 前言

塑料超声波焊接技术是借助超声波使塑料件接触面的分子快速融合在一起的加热连接方法。利用超声波发生器将低频的电转化为 20 ~ 40 kHz 的高频电能,电能通过换能器转化为同频率的纵向机械振动,这种振动通过调幅器和焊头传递给放置在基座上的焊接试样,在机械振动引起的动态机械力作用下使焊接区试样表面温度升高熔化,挤出形成一定厚度的熔化层,焊接后在一定时间内保持压力,直到熔化层冷却凝固成为可靠的接头^[1]。

塑料超声波焊接技术具有焊接时间短、表面无损坏、非焊接区域不发热等优点,目前已经广泛地应用于航空航天、仪器仪表、食品包装等领域。迄今为止,各国的研究者对它进行了大量的研究工作,主要

集中在焊接工艺参数^[2~3]、焊接过程^[4]和焊接设备^[5]等方面,但是对焊接质量影响因素的研究很不系统。本文综述了焊接材料、工艺参数、连接形式三个方面对焊接质量的影响规律。

2 焊接材料对焊接质量的影响

超声波焊接原则上可以焊接所有的热塑性塑料。按照焊接技术特性可以把高分子材料分为三类^[6]: (1) 柔性材料,指软质、低弹性模量材料; (2) 刚性材料,指高弹性模量和低机械振动阻尼因子材料,例如聚苯乙烯 (PS)、聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)、聚酰胺 (PA); (3) 所有的高分子薄膜、高分子合成纤维、由薄膜和纤维组成的布,塑料超声波焊接方法是焊接此类材料的最佳方法。表 1 介绍了几类材料的超声波焊接工艺参数。

收稿日期: 2006 - 03 - 20; 修回日期: 2006 - 09 - 22

作者简介: 高阳, 1980 年出生, 硕士, 主要从事特种工程塑料及成型工艺的研究工作

表 1 几类材料的超声波焊接工艺参数

Tab 1 Basic values of parameter for ultrasonically welded materials

材料种类	焊接时间 /s	焊接压强 /MPa	振幅 / μm	频率 /kHz
柔性材料 ^[6]	1~5	<3	10~15	20
PS ^[6]	5~7	10~15	10~40	20
PMMA ^[6]	5~7	<1.5	<20	20
PA ^[6]	10	<500(N)	<50	21.5
薄膜、纤维布 ^[7]	-	<2	40	40

2.1 焊接材料物性参数的影响

一般来说,塑料超声波可焊性取决于公式:

$$G = \frac{KE\mu}{ct} \quad (1)$$

式中, K 为焊件形状因子; E 为弹性模量; μ 为摩擦系数; λ 为热导率; ρ 为密度; c 为比热容; t 为熔点。

从公式(1)可知,焊接质量与弹性模量、摩擦系数、热导率成正比,与其密度、比热容、熔点成反比。其中焊接质量主要与材料的熔点和表面摩擦系数有关^[8]。这些参数因材料和温度的不同而不同,它们在焊接过程中的变化将影响焊接区域的温度、应力和变形,从而影响焊接质量。但是超声波焊接时间很短,很难通过试验控制参数的变化,国内外学者利用数值模拟方法来解决这一问题。例如刘川^[9]利用有限元方法分析超声波焊接过程中聚氯乙烯(PVC)的物理参数的影响,得到了焊接区域温度沿试样厚度的变化规律(图1)。

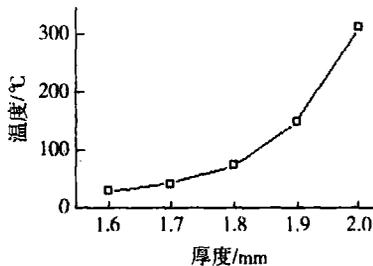


图 1 温度与试样厚度关系 (PVC)

Fig 1 Temperature versus thickness of sample for PVC

此外,塑料的分子量与焊接接头强度有一定比例关系。分子量高,熔融分子链流动扩散需要的超声波能量就大,焊接压力、振幅和时间就要增加,容易造成焊接接头强度降低^[10]。

2.2 焊接材料改性的影响

焊接材料的改性会影响焊接质量,例如 Sancar^[11]等对碳酸钙、滑石粉和玻璃纤维等填料改性聚丙烯进行了超声波焊接,焊接工艺参数选择基准焊接条件(焊接时间为 0.25 s,焊接压力为 240 N,焊接振幅为 51.8 μm),发现焊接接头强度和断裂伸长率随着每种填料含量的增加而下降,其中滑石粉的影响程度最大,玻璃纤维(GF)和碳酸钙的影响较小。Liu等^[12]对纯聚丙烯(PP)、GF/PP复合材料进行超声波焊接,其中焊接时间均为 0.33 s,焊接振幅均为 40 μm ,发现焊接接头强度随着纤维含量增加而降低。Liu等^[13]对玻璃纤维增强尼龙复合材料的超声波焊接工艺参数进行了研究,其中玻璃纤维的质量分数为 15%和 35%,发现随纤维含量增加,只要延长焊接时间,焊接接头强度就会增加。纤维等填料的加入能够提高高分子材料的硬度,有利于超声波的传递,在适宜的工艺条件下填料加入可以提高焊接接头强度。

2.3 材料表面粗糙度的影响

增加材料表面粗糙程度可以降低声阻抗,提高表面能流密度,从而提高其焊接质量。侯旭光等^[14]在 PP 包装袋的研究过程中发现,采用表面有滚制花纹的膜材料能够得到更高的焊接质量,比表面光滑的 PP 膜的焊接接头强度提高接近一倍。

2.4 材料搭接宽度的影响

材料搭接宽度的增加使焊接接头强度降低。因为随着搭接宽度增加,焊接接头边缘应力集中增加,边缘出现的微裂纹增多,接头强度降低。Matsuo^[15]焊接用层合法和浸渍法制备的玻璃纤维改性 PP,焊接接头强度都随着宽度增加而降低。

2.5 焊接面到焊头距离的影响

材料焊接面到焊头的距离达到半波长值时焊接接头强度最大。因为超声波在塑料中传递主要是纵向波,最大纵向波峰值往往出现在半波长,距离接近半波长时超声波传递给焊接界面热能量最多,能得到良好的焊接接头。针对不同厚度的 HS1000(芳基磷酸盐和粘土改性的聚苯醚,半波长为 3.86 cm)进行超声波焊接,结果发现存在临界厚度为 3.86 cm,小于临界厚度时焊接接头强度和伸长率随厚度的增加而增加,大于临界厚度时焊接接头强度迅速降低^[16]。

3 工艺参数对焊接质量的影响

塑料超声波焊接包括振幅、焊接时间、焊接压力等工艺参数,这些工艺参数以及参数之间的共同作用都对焊接质量有影响。

3.1 振幅的影响

振幅是塑料在超声波焊接时首要选择的工艺参数。材料在特定的超声波频率下都有适宜的振幅范围,表 2 介绍了几种常用的塑料在 20 kHz 下所需的振幅范围^[9]。

表 2 超声波焊接热塑性塑料所需的振幅范围

Tab 2 Range of amplitude for ultrasonically welded thermoplastic

材料	振幅范围 / μm	材料	振幅范围 / μm
PS	15 ~ 30	PVC	20 ~ 40
ABS ¹⁾	20 ~ 30	PE	25 ~ 60
PMMA	20 ~ 35	PP	30 ~ 60

注: 1) ABS 为苯乙烯—丁二烯—丙烯腈共聚物。

在适宜的振幅范围内,振幅增加有利于超声波能量的扩散,从而提高焊接接头强度。例如 Sancaktar^[11]在 40 ~ 53 μm 振幅范围内发现 PP 焊接强度随振幅的增加而呈上升趋势; Liu^[12]在 25 ~ 40 μm 振幅范围研究 PP 和玻璃纤维增强聚丙烯复合材料,发现焊接强度随振幅增加而增加。

振幅对焊接质量的影响并不完全满足上述规律。Benatar^[17~18]在 1 ~ 60 μm 振幅范围内研究塑料超声波焊接,发现非晶材料 PS、ABS 焊接接头强度受振幅变化的影响不大;半晶材料 PE、PP 振幅达到 25 μm 后焊接接头强度随振幅增大而增加,小于 25 μm 时恰好相反,而且发现振幅为 15 μm 时塑料的焊接接头强度值较大,这点值得注意。卢彤^[19]从熔融层厚度角度进一步阐述了振幅与焊接质量的关系,试验表明熔融层厚度随振幅增大而略微减小,导致 PS 焊接接头的剪切强度增加,弯曲强度降低。

此外,塑料焊接所需的振幅还受焊接形式种类和焊接设备频率的影响。嵌插和铆接所需振幅较大,而平面焊所需振幅较小。90 kHz 的超声波塑料焊接设备的振幅是 27 kHz 焊接设备振幅的三分之一,90 kHz 的超声波能够使焊接面温度更快地升高到较高的值^[20]。

3.2 焊接时间的影响

宇航材料工艺 2006 年 第 6 期

实验证明,要想得到良好的焊接接头,必须选择适当的焊接时间,过长和过短的焊接时间都会造成焊接接头强度的下降。Benatar 等^[17~18]发现在近程焊接 PP、高密度聚乙烯时,焊接接头强度随着焊接时间的增加而增加,当焊接时间超过一定值(约 1.5 s)后,焊接接头强度开始下降。ABS、PS 在远程焊接中出现类似情况,转折点在 2.4 s 附近。超声波焊接 PVC 板材^[9]、PP 包装袋^[14]的正交试验中发现焊接时间同样出现转折点,分别为 0.29 s 和 5 s。见图 2。

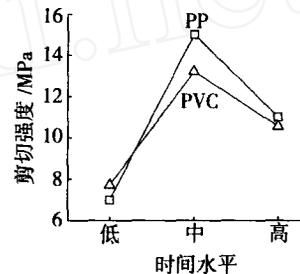


图 2 不同焊接时间水平与接头质量关系

Fig 2 Relation between joint quality and different level of welding time

焊接时间不受材料的厚度影响,薄膜的超声波焊接同样存在较优的焊接时间。吴德光^[21]对双向拉伸聚酯/低密度聚乙烯复合膜进行了超声波焊接研究,结果表明焊接时间对焊接接头质量的影响规律与上述一致,在 0.25 s 时焊缝热强度和冷强度均达到较大值。

3.3 焊接压力的影响

在其他因素确定的情况下,取得较优焊接接头强度的焊接压力存在一定范围。例如 Matsuoka^[15]对玻璃纤维增强的聚丙烯复合材料搭剪试样进行了试验研究,压力小于 0.15 MPa 接头强度随压力增大而增加,超过 0.15 MPa 后接头强度达到一个比较稳定的状态,约为 35 MPa,当焊接压力超过 0.4 MPa,聚丙烯会从基体中严重挤出,焊接接头强度降低。

焊接压力对焊接质量的影响比较复杂。周生玉等^[22]超声波焊接 PP 发现,焊接压力对焊接熔融区的厚度和取向程度有较大影响,焊接压力增加,熔融层厚度减小,焊接接头的取向程度增加,宏观表现为焊接压力增加,接头沿取向方向的剪切强度增加,垂直于取向方向的弯曲强度降低。Harras 等^[23]超声

波焊接碳纤维增强聚醚醚酮复合材料板,发现断裂韧性与焊接压力关系图中的数据点很分散,并通过红外光谱和扫描电镜对试样断口分析,发现分子取向对焊接质量的影响不明显。材料分子取向对焊接质量的影响还需进行进一步的研究。

3.4 焊头下降速度的影响

在一定的条件下,焊头下降速度越快,达到的焊接接头强度越高。在超声波焊接过程中,高的下降速度能够得到高的接触压力,有利于焊接界面紧密地接触和分子充分地扩散。文献[16]表明使用25、50、100 mm/s三种焊头下降速度来焊接HS1000,下降速度增加到100 mm/s的平均焊接接头强度更高,达到28.38 MPa。

3.5 保压时间和保压压力的影响

超声波停止后,为了使焊接试样相互紧贴固化,从而使两工件能够很好地焊接在一起,需要在一定时间内保持一定的压力,所需的时间和压力就是保压时间和保压压力。文献[24]结果表明保压时间和保压压力对焊接接头强度的影响是正面的,但相对于其他工艺参数,保压时间和保压压力对焊接接头强度的影响很小。

4 焊接面连接形式对焊接质量的影响

焊接面形状对焊接质量有很大的影响。常用的平面搭接方式由于两工件在压力作用下紧密接触,熔化材料没有足够的流延空间,在不能流延的地方形成了应力集中区域,应力集中会严重影响焊接接头强度,而且此方法容易导致焊接材料分解、脆化、氧化,从而影响焊接质量。

4.1 导能筋的影响

导能筋用来增加能量传递,缩短焊接时间,降低边缘应力集中。导能筋主要有三角形、矩形和半圆型三种形式^[25],对聚乙烯、ABS树脂、30% (质量分数)玻璃纤维增强PP研究发现,焊接接头强度最大的是半圆型导能筋、矩形导能筋次之、三角形导能筋最小,但是超声波焊接纯的PP和10% (质量分数)玻璃纤维增强PP时,发现使用三角形导能筋的焊接接头强度较大,这是由于纯PP和10% (质量分数)玻璃纤维增强PP的硬度不够,在压力作用下导能筋变形所致^[12]。其中三角形导能筋的角度会影响焊接质量,刘川^[14]超声波焊接PVC材料,发现采用90°导能筋的焊口形式比较合理,焊接质量能够

保证。导能筋能够提高焊接强度,但是导能筋制作困难,成本较高。

4.2 连接层材料的影响

连接层材料能够吸收超声波,提高焊接接头材料的软化和熔融程度,能够焊接取向材料以及不同类型的高分子材料。Tateishi等^[26~27]研究了取向聚丙烯的超声波焊接,在焊接过程中使用了熔融指数为0.03~30的五种连接层材料,使用低熔融指数的连接层材料时,接头材料的峰值温度高,焊接区域有很大变化;使用高熔融指数的连接层材料时,焊接区域尺寸变化小,可以形成均匀透明的焊接接头。连接层材料的引入能够扩大工艺参数的选择范围,但轻微地降低了焊接后剪切强度,而且增加了剪切强度值的分散程度,在焊接区域边缘容易出现飞边,造成焊接外观质量不佳。

5 结束语

塑料超声波焊接机制复杂,焊接质量受众多因素影响。对材料进行焊接时,首先要考虑其可焊性,低熔点、高表面摩擦系数的材料可得到较优焊接质量,在适宜的工艺参数下,增强材料加入能够提高焊接质量;其次,超声波的振幅、焊接时间、焊接压力是影响焊接质量的主要工艺参数,得到较佳焊接质量的三个工艺参数都存在一定的范围;第三,在焊接界面引入导能筋和连接层能够提高焊接强度。使用导能筋能够连接高熔点的热塑性聚合物,使用连接层能够使取向材料及不同类型材料进行焊接。

随着多种不同特性的塑料之间相互连接需要的增加,需要在以下几个方面加强超声波焊接技术的研究:(1)深入研究焊接区域的状态,包括熔融区厚度、结晶度、取向程度、化学组分等,深入研究塑料超声波焊接技术的机理;(2)进一步完善塑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;(3)利用有限元法模拟焊接过程焊接区域温度、应力变化规律,为实验起指导作用;(4)研究新的导能机构和连接层材料,扩大焊接技术的应用范围;(5)建立焊接设备、工艺参数、常用材料的对应关系规律,减少实验次数,降低成本。

参考文献

- 1 Gutnik V G, Gorbach N V. Some characteristics of ultrasonic welding of polymers. *Fiber Chemistry*, 2002; 34 (6): 426 ~ 432

- 2 Alejandro A et al An optimization study of the ultrasonic welding of thin film polymers In: American society of mechanical engineers(ASME) design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference, 2004: 75 ~ 84
- 3 Wijk H V. Process optimization of ultrasonic welding Poly. Eng. Sci., 1996; 36(9): 1 165 ~ 1 176
- 4 Nonhof C J. Estimates for process conditions during the ultrasonic welding of thermoplastics Poly. Eng. Sci., 1996; 36(9): 1 177 ~ 1 183
- 5 Jiramaru Tsujino, Misugi Hongoh, Masafumi Yoshikuni et al Welding characteristics of 27, 40 and 67 kHz ultrasonic plastic welding systems using fundamental and higher-resonance frequencies Ultrasonics, 2004; 42(1~9): 131 ~ 137
- 6 Gutnik V G, Gorbach N V. Some characteristics of ultrasonic welding of polymers Fiber Chemistry, 2002; 34(6): 426 ~ 432
- 7 Fomenko A V. Ultrasonic welding of polymer multi-layer film materials Russian Ultrasonics, 2001; 31(1): 27 ~ 31
- 8 陈传梁. 超声波熔接技术. 电加工, 1989; 1(6): 15 ~ 22
- 9 刘川. 超声波塑料焊接机理与工艺试验的研究. 大连理工大学硕士学位论文, 2003
- 10 Wool Welding of polymer interface Polym. Eng. Sci., 1989; 29(19): 1 340 ~ 1 365
- 11 Eröl Sancaktar, Eric Waleker Effects of calcium carbonate, talc, mica, and glass-fiber fillers on the ultrasonic weld strength of polypropylene Journal of Applied Polymer Science, 2004; 94(4): 1 986 ~ 1 998
- 12 Liu S J, Chang I T. Factors affecting the joint strength of ultrasonically welded polypropylene composites Polymer Composites, 2001; 22(1): 132 ~ 141
- 13 Liu S J and Chang I T. Optimizing the weld strength of ultrasonically welded nylon composites Journal of Composite Materials 2002; 36(5): 611 ~ 624
- 14 侯旭. 超声波塑料焊接工艺参数的研究. 哈尔滨工业大学硕士论文, 2001
- 15 Matsuoka S I Ultrasonic welding and characteristics of glass fiber reinforced plastic: comparison between the paper-making method and the impregnation method Journal of Materials Processing Technology, 1995; 55(3~4): 427 ~ 431
- 16 Eröl Sancaktar Polymer adhesion by ultrasonic welding Journal of Adhesion Science, 1999; 13(2): 187 ~ 190
- 17 Avraham Benatar et al Ultrasonic welding of thermoplastics in the near-field Poly. Eng. Sci., 1989; 29(23): 1 689 ~ 1 698
- 18 Avraham Benatar et al Ultrasonic welding of thermoplastics in the far-field Poly. Eng. Sci., 1989; 29(23): 1 699 ~ 1 704
- 19 卢彤. 塑料超声波焊接过程及质量影响因素研究. 哈尔滨工业大学硕士论文, 1999
- 20 Jiramaru Tsujino et al New methods of ultrasonic welding of metal and plastic materials Ultrasonics, 1996; 34(2~5): 177 ~ 185
- 21 吴德光. 论包装塑料膜的焊合与质量. 云南农业大学学报, 1996; 11(1): 39 ~ 44
- 22 周玉生, 阎久春, 卢彤等. 塑料超声波焊接过程及质量研究 焊接接头质量影响因素分析. 材料科学与工程, 1999; 7(增刊): 60 ~ 62
- 23 Harras B, Cole K C, Khanh T V. Optimization of the ultrasonic welding of PEEK-carbon composites Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1996; 15(2): 174 ~ 182
- 24 Liu S J, Liu W F, Chang B C et al Optimizing the joint strength of ultrasonically welded thermoplastics Advances in Polymer Technology, 1999; 18(2): 125 ~ 135
- 25 Chuah Y K, Chien L H, Chang B C et al Effects of shape of the energy director on far-field ultrasonic welding of thermoplastics Poly. Eng. Sci., 2000; 40(1): 157 ~ 167
- 26 Tateishi N, North T H, Woodhams R T Ultrasonic welding using tie-layer materials Part I: Analysis of process operation Poly. Eng. Sci., 1992; 32(9): 600 ~ 611
- 27 Tateishi N, North T H, Woodhams R T. Ultrasonic welding using tie-layer materials Part II: Factors affecting the lap - shear strength of ultrasonic welds Poly. Eng. Sci., 1992; 32(9): 612 ~ 619

(编辑 李洪泉)