

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.03.019

基于盲孔法的 ABS 热焊板件残余应力测量

夏建盟¹, 黄池光¹, 许晶玮^{1,2}, 汪炉林^{1,2}, 胡付余¹, 杨明¹

(1. 上海金发科技发展有限公司, 上海 201714; 2. 金发科技股份有限公司塑料改性与加工国家工程实验室, 广州 510663)

摘要: 采用盲孔法对4种丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)热焊板进行了残余应力的测量, 获得了这4种热焊板焊趾区的残余应力数据, 结果发现, ABS经过热焊成型后容易在焊趾区形成较高的残余应力, 随着测量时间的延长, 热焊板焊趾区的残余应力逐渐增大, 在测量7 min后释放完全。为了验证盲孔法应用于塑料热焊板残余应力检测的可行性, 对ABS热焊板母材区和焊趾区以及热处理前后焊趾区的残余应力进行了测量, 同时测试了4种热焊板的焊接强度, 发现母材区的残余应力低于焊趾区, 80℃热处理后焊趾区的残余应力比热处理前的低, 残余应力较低的热焊板具有较高的焊接强度, 这些结果均表明盲孔法对塑料热焊板件残余应力测量结果具有一定的参考价值。

关键词: 塑料; 盲孔法; 残余应力; 测量

中图分类号: TG404 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)03-0096-04

Measurement on Residual Stress of Thermal Welding ABS Plates by Blind Hole Method

Xia Jianmeng¹, Huang Chiguang¹, Xu Jingwei^{1,2}, Wang Lulin^{1,2}, Hu Fuyi¹, Yang Ming¹

(1. Shanghai Kingfa Science and Technology Co. Ltd., Shanghai 201714, China; 2. National Engineering Laboratory for Plastic Modification and Processing, Kingfa Science and Technology Co. Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: A blind hole method was introduced to measure residual stress of thermal welding plastic plates including four kinds of ABS plates, the residual stress values of welded toe zones of the thermal welding plastic plates were gained. The results show that after welding, the higher residual stress is easy to form in the welded toe zone of ABS plates, with increase of measuring time, the residual stresses of the welded toe zones increase and release completely after measuring 7 min. In order to investigate the feasibility of applying the blind hole method to the measurement on the residual stress of plastics, the residual stresses of base zones and welded toe zones of ABS as well as the residual stresses of welded toe zones of ABS before and after heat treatment were measured, meanwhile, the welding strengths of the four kinds of ABS plates were determined. It is presented that the residual stresses of base zones are lower than those of welded toe zones, and the welded toe zones treated at 80℃ have lower residual stresses, the welding ABS plates with low residual stress have high welding strength, which show that the blind hole method can be reference for measurement on residual stress of thermal welding plastic plates.

Keywords: plastic; blind hole method; residual stress; measurement

丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)作为一种通用塑料,具有工程塑料的性能,其制品广泛应用于电讯、航空航天、机械制造和运输等行业。如果ABS制品结构简单,可以通过注塑一次成型,如果制品结构复杂或尺寸较大,往往难以一次成型,需要进行二次连接。目前,二次连接的方法主要有电气焊接、热板焊接、注胶焊接和胶结连接等。由于经济有效、操作简单的缘故,热板焊接在施工现场被广泛使用。热板焊接,是采用热熔对焊机对制品进行加热,使其熔化,然后迅速将熔融端面贴合,维持一定的压力,冷却后达到热熔焊接的目的,特别适用于成型尺寸较大,需要密封结构的制品。

然而, ABS等塑料热熔焊接过程是一个受限的

非均匀熔融、固化过程,受焊缝附近区域温度场的影响,焊件内部会出现大小不等、分布不均匀的残余应力场。在制品的应用过程中,焊接残余的内应力将与工作应力相互叠加,使制品发生翘曲,同时残余应力重新分布,这不但影响制品的美观和降低焊接结构的强度,还会在温度或介质的共同作用下,影响热焊连接区域的抗疲劳性能、抗脆断能力以及抵抗应力腐蚀开裂和高温蠕变开裂的能力^[1-3]。因此,如果可以对热焊制品进行残余应力的测量,那么就可以从配方设计、制造工艺和后处理工艺等方面提高热焊制品的质量和寿命。

联系人: 黄池光, 硕士, 主要从事改性塑料研究

收稿日期: 2015-12-11

目前,分析塑料热焊残余应力的方法主要是溶剂法和有限元法。溶剂法主要通过将塑料制品在特定溶液中浸泡,观察其裂纹出现的数量和粗细,判断其残余应力情况,但此方法难以定量分析残余应力的方向和大小。有限元法是通过模拟其分布和形成过程,分析热焊连接过程的瞬时温度梯度场以及残余应力应变场,并计算其应力值^[4-7],但是由于热焊过程的复杂性以及理论模型的约束性,使得理论值与实测值往往有一定差距,因此,对焊接件进行残余应力的实际测量是十分有必要的。笔者选用操作方便、适合现场测量的盲孔法对4种ABS热焊板进行残余应力的测量并探讨其可行性。

1 实验部分

1.1 主要原材料

ABS(AG15A1, AG10NP):台湾化学纤维股份有限公司;

ABS(DG-MG94):天津大沽化工股份有限公司;

ABS(518AC):金发科技股份有限公司。

以上材料性能参数如表1所示。

表1 材料性能参数

项 目	ABS 牌号			
	DG-MG94	AG15A1	518AC	AG10NP
拉伸弹性模量/MPa	2370	2450	2260	1830
泊松比	0.394	0.394	0.394	0.394

1.2 主要设备及仪器

盲孔法应力检测仪:HK21B型,山东华云机电科技有限公司;

磁吸式钻孔装置:HK21B, II型,山东华云机电科技有限公司;

电子万能拉力试验机:Z250型,德国Zwick公司。

1.3 试样制备

ABS焊件采用规格为80 mm×40 mm×4 mm的矩形板,对接热焊而成,焊接试件如图1所示。为了能更准确地反映盲孔法测量的结果,选择了由牌号为DG-MG94, AG15A1, 518AC, AG10NP的ABS制备的热焊板,分别以ABS-1, ABS-2, ABS-3, ABS-4表示。焊接过程中,热板温度控制在(285±2)℃。热焊接工艺过程及参数设置如图2所示,其主要分为加热阶段和固化阶段,加热阶段是在 $P_1=10$ MPa的压力下,用热铜板对矩形板的一侧面加热 $t_1=15$ s,固化阶段是撤去热铜板后,在 $P_2=10$ MPa的压力下将两块矩形板对接冷却固化,然后再把压力降到

$P_3=0$ MPa,固化总时间为 $t_2=24$ s。

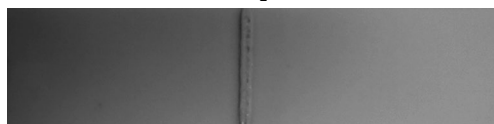


图1 ABS热板焊接样件

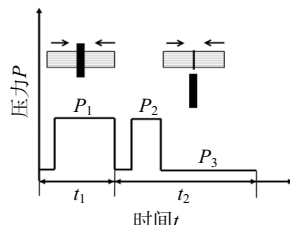


图2 热板焊接工艺过程及参数设置

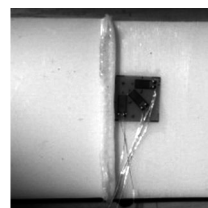
1.4 测试与表征

(1) 热焊板残余应力测量。

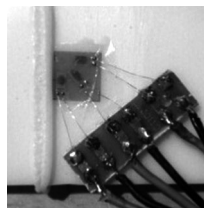
测量热焊板残余应力主要分为4个步骤:表面打磨、粘贴应变片、连接应变计和钻孔,如图3所示。应变值由应变测量仪记录,将钻孔后某一段时间下测得的应变值 ϵ_1 (平行于焊缝方向), ϵ_2 (与焊缝成45°角的方向), ϵ_3 (垂直于焊缝方向)代入公式(1)~(3)可以计算出残余应力中两个主应力 σ_1 , σ_2 的大小和应力产生的方向 θ ^[8]。



(a)



(b)



(c)



(d)

a—表面打磨;b—粘贴应变片;c—连接应变计;d—钻孔

图3 盲孔法测量焊趾区残余应力的过程

$$\sigma_1 = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} + \frac{\sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (2\epsilon_2 - \epsilon_1 - \epsilon_3)^2}}{4B} \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} - \frac{\sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (2\epsilon_2 - \epsilon_1 - \epsilon_3)^2}}{4B} \quad (2)$$

$$\tan 2\theta = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2}{\epsilon_1 - \epsilon_3} \quad (3)$$

$$A = -\frac{1+\mu}{2E} \times \frac{1}{R^2} \quad (4)$$

$$B = \frac{2}{ER^2} - \frac{3(1+\mu)}{2ER^4} \quad (5)$$

式中: E ——材料的拉伸弹性模量;

μ ——材料的泊松比;

R ——应变片的参数。

(2) 热焊板焊接强度测试。

热焊板焊接强度按 GB/T 1040-2006 测试,焊接板尺寸为 156 mm×40 mm×4 mm,加载速度 10 mm/min,夹具间的距离为 100 mm。

2 结果与讨论

2.1 ABS 热焊板的残余应力测量

由于熔融聚合物表层和内层的冷却收缩速率不同,热焊板冷却后会在焊缝附近的焊趾区形成较高的热残余应力场,在焊趾区钻一个一定直径和深度的盲孔后,该区域残余应力平衡被打破,盲孔将释放一些残余应力,产生一定量的应变。利用应变测量仪测出释放的应变,即可利用相应的计算公式(1)~(3),计算出该测点释放的残余应力大小。热焊板焊趾区残余应力测点位置如图 4 所示,测量结果如表 2 和表 3 所示。

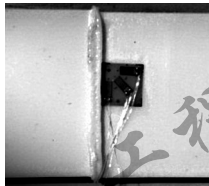


图 4 焊趾区残余应力测点位置示意图

表 2 不同测量时间下 ABS-1 和 ABS-2 热焊板焊趾区

残余应力的测量结果

项 目	测量时间 (ABS-1)/min			测量时间 (ABS-2)/min		
	1	4	7	1	4	7
$\varepsilon_1/\mu\varepsilon$	-12	-60	-120	+34	-20	-54
$\varepsilon_2/\mu\varepsilon$	-27	-78	-142	-5	-59	-95
$\varepsilon_3/\mu\varepsilon$	-92	-137	-165	-72	-110	-139
σ_1/kPa	+1 490	+2 460	+3 220	+870	+1 800	+2 480
σ_2/kPa	+730	+1 750	+2 860	-40	+1 050	+1 760
$\theta/(^{\circ})$	-15	-14	0	-6	-3	-1

注: +表示压缩性质, -表示拉伸性质,下同。

表 3 不同测量时间下 ABS-3 和 ABS-4 热焊板焊趾区

残余应力的测量结果

项 目	测量时间 (ABS-3)/min			测量时间 (ABS-4)/min		
	1	4	7	1	4	7
$\varepsilon_1/\mu\varepsilon$	+49	+14	-8	+1	-69	-104
$\varepsilon_2/\mu\varepsilon$	+4	-43	-78	-22	-103	-149
$\varepsilon_3/\mu\varepsilon$	-72	-111	-141	-125	-190	-231
σ_1/kPa	+710	+1 470	+2 020	+1 480	+2 540	+3 160
σ_2/kPa	-250	+490	+1 000	+540	+1 720	+2 340
$\theta/(^{\circ})$	-7	-2	+1	-16	-11	-8

对于热焊板,最容易发生开裂的地方是焊趾区。根据表 2 和表 3 的结果,可以发现热焊板焊趾区的残余应力值与测量时间有关,随着测量时间的增加,残余应力值逐渐变大,这是因为热焊板中焊趾

区的应力场平衡受到破坏,应力场在重新调整的过程中,残余应力逐渐释放,从而导致其值逐渐变大。测量 7 min 后,材料的残余应力释放完全,残余应力值基本保持不变。

在测量 7 min 后,ABS-1, ABS-2, ABS-3 和 ABS-4 的 $(|\sigma_1|, |\sigma_2|)$ 分别为 (3 220, 2 860), (2 480, 1 760), (2 020, 1 000) 和 (3 160, 2 340), 从测量结果可以看出, ABS 经过热焊成型后焊趾区积累了较高的残余应力,这可能是由于 ABS 中的橡胶相分子链大,在经过快速高压熔融冷却后难以及时松弛,从而保留了较高的残余应力。

2.2 盲孔法测量塑料热焊板残余应力的有效性评价

目前,并无非常准确的方法来完全定量验证塑料热焊板残余应力测量的有效性,笔者分别采用 3 种方法从不同方面对盲孔法测量 ABS 热焊板残余应力的有效性进行了评价: 塑料热焊板母材区和焊趾区的测量对比; 80℃热处理前后焊趾区测量对比; 塑料热焊板的焊接强度测量对比。

(1) 塑料热焊板母材区和焊趾区的测量对比。

相对于焊趾区,热焊板的母材区距离热焊缝较远,难以产生较高的温度梯度,一般认为,距离热焊缝 2 cm 的区域基本不会受到加热作用而产生热残余应力,与焊趾区相比,其残余应力会处于比较低的水平。以 ABS-1 为例,对 ABS-1 热焊板母材区和焊趾区进行了残余应力测量,测点位置如图 5 所示,测量结果如表 4 所示。由表 4 可以看出,测量 7 min 后,ABS-1 母材区的残余应力值为 (270, 140), 而焊趾区的残余应力值为 (3 220, 2 860), 母材区的残余应力远小于焊趾区。对其它 3 种 ABS 热焊板进行了相应的测量,也发现了类似的现象。



图 5 ABS-1 热焊板母材区和焊趾区测点位置

表 4 不同测量时间下 ABS-1 热焊板母材区和焊趾区

残余应力的测量结果

项 目	测量时间 (母材区)/min			测量时间 (焊趾区)/min		
	1	4	7	1	4	7
$\varepsilon_1/\mu\varepsilon$	+2	+3	-2	-12	-60	-120
$\varepsilon_2/\mu\varepsilon$	-2	-2	-6	-27	-78	-142
$\varepsilon_3/\mu\varepsilon$	-12	-11	-17	-92	-137	-165
σ_1/kPa	+160	+140	+270	+1 490	+2 460	+3 220
σ_2/kPa	+30	+20	+140	+730	+1 750	+2 860
$\theta/(^{\circ})$	-6	-6	-11	-15	-14	0

(2) 80℃热处理前后焊趾区测量对比。

对塑料热焊板进行热处理后,板件中的高分子链会得到一定的松弛,焊缝附近区域的高应力场会被削弱,释放一定量的应力,残余应力会重新调整平衡,内应力往往较低。以ABS-2为例,对ABS-2未热处理和热处理后的残余应力进行了测量,测点位置如图6所示,测量结果如表5所示。由表5可以看出,测量7 min后,热处理后的残余应力值为(810,930),而未热处理为(2 480,1 760),热处理后残余应力较未热处理大幅下降。对其它3种ABS热焊板进行了相应的测量,也发现了类似的现象。

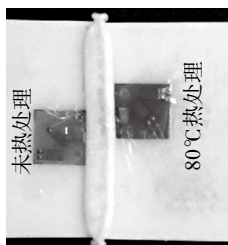


图6 ABS-2热焊板热处理前后测点位置

表5 不同测量时间下ABS-2热处理前后残余应力的测量结果

项 目	测量时间(热处理后)/min			测量时间(热处理前)/min		
	1	4	7	1	4	7
$\varepsilon_1 / \mu \varepsilon$	+16	+21	+37	+34	-20	-54
$\varepsilon_2 / \mu \varepsilon$	+29	+33	+46	-5	-59	-95
$\varepsilon_3 / \mu \varepsilon$	+26	+34	+42	-72	-110	-139
σ_1 / kPa	-390	-540	-810	+870	+1 800	+2 480
σ_2 / kPa	-550	-680	-930	-40	+1 050	+1 760
$\theta / (^{\circ})$	+28	+18	+35	-6	-3	-1

(3) 塑料热焊板的焊接强度测量对比。

残余应力的存在会破坏材料的结构,往往会降低焊接的强度。表6为4种ABS热焊板焊接强度测试结果。由表6可以看出,ABS-1,ABS-2,ABS-3和ABS-4的焊接强度分别为34.0,38.9,40.1,36.5 MPa,其对应的残余应力分别为(3 220,2 860),(2 480,1 760),(2 020,1 000)和(3 160,2 340),对比ABS热焊板的焊接强度和残余应力值可以发现,材料积累的残余应力越大,其焊接强度越低,其与前述的残余应力测量对比结果一致。

表6 ABS热焊板的焊接强度

项 目	ABS-1	ABS-2	ABS-3	ABS-4
焊接强度	34.0	38.9	40.1	36.5

综上所述,以上3种方法的验证结果表明盲孔法应用于塑料热焊板残余应力的测量结果具有一定参考价值。

3 结论

(1) 采用盲孔法对ABS热焊板的焊趾区进行残余应力测量,发现ABS经过热焊成型后容易在焊趾区积累较高的残余应力,并且残余应力的释放与测

量时间有关,随着测量时间的延长,残余应力逐渐增大,在测量7 min后释放完全。

(2) ABS热焊板母材区的残余应力低于焊趾区,80℃热处理后热焊板的残余应力较热处理前的低,残余应力高的热焊板的焊接强度较低,以上结果均表明盲孔法对于ABS热焊残余应力的测量具有一定的可行性。

参考文献

- [1] 李文学,王晓华. PVC塑料门窗型材焊缝开裂原因分析[J]. 工程塑料应用,2011,39(9):53-54.
Li Wenxue, Wang Xiaohua. Reasons analysis of weld cracking of PVC plastic door and window profile[J]. Engineering Plastics Application, 2011, 39(9):53-54.
- [2] 库媛. 超声波焊接参数对PP-ABS接头抗拉强度的影响[D]. 吉林: 吉林大学,2014.
Ku Yuan. Influence of ultrasonic welding parameters on the tensile strength of the joints between PP and ABS[D]. Jilin: Jilin University, 2014.
- [3] 王志禹. 浅谈塑料门窗焊角开裂成因和预防措施[J]. 山西建筑, 2011, 37(29):191-192.
Wang Zhiyu. On reasons for cracks on welded angles of plastic windows and doors and prevention measures[J]. Shanxi Architecture, 2011, 37(29):191-192.
- [4] 刘恒. 注塑成型制品残余应力和模后收缩的数值模拟[D]. 郑州: 郑州大学,2011.
Liu Heng. Numerical simulation of residual stress and shrinkage after ejection for injection molded parts[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2011.
- [5] 刘红,陈先立,蒋兰芳,等. 注塑件去应力过程数值模拟[J]. 塑料工业,2007,23(6):16-19.
Liu Hong, Chen Xianli, Jiang Lanfang, et al. Numerical simulation on reducing residual stress methods of injection molding products[J]. China Plastics Industry, 2007, 23(6):16-19.
- [6] 王韬,颜悦. 注塑件残余应力数值模拟分析及工艺优化[J]. 塑料工业,2012,40(12):42-45.
Wang Tao, Yan Yue. Numerical simulation analysis and process optimization of the plastic residual stress[J]. China Plastics Industry, 2012, 40(12):42-45.
- [7] Azaman M D, Sapuan S M, Sulaiman S, et al. Numerical simulation analysis of the incavity residual stress distribution of lignocellulosic(wood) polymer composites used in shallow thin-walled parts formed by the injection moulding process[J]. Materials and Design, 2014, 55:381-386.
- [8] 谷侃锋. 高密度聚乙烯压力管道热板焊接接头应力场有限元模拟[D]. 沈阳: 中国科学院沈阳自动化研究所,2003.
Gu Kanfeng. Numerical simulation of hot plate welding stress strain in high-density polyethylene[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Sciences, 2003.