

激光深熔焊熔池 X 光图像恢复与特征分析

高向东¹, 向俊斌¹, Khalid M. Hafez², Katayama Seiji³

(1. 广东工业大学 机电工程学院, 广州 510006;

2. Central Metallurgical R & D Institute, Cairo 11435; 3. 大阪大学 接合科学研究所, 大阪 567-0047)

摘 要: X 光对于焊件具有很强的穿透性, 可以利用其观测和分析激光深熔焊过程焊件内部熔池形态以及匙孔能量传递效果, 实现对焊接过程有效地实时监测。在大功率光纤激光焊接 304 不锈钢过程中, 由于 X 光图像采集过程中的噪声干扰, 导致熔池 X 光图像存在严重退化现象, 清晰度不高, 识别性较差。为此研究一种图像恢复和增强算法, 对熔池 X 光退化图像进行恢复和增强处理, 使其在处理后能够更好地被识别。以盲去卷积法估计出熔池 X 光图像退化的点扩散函数, 并以此函数为参数对熔池 X 光图像进行维纳滤波恢复, 再进行灰度变换以增强图像, 进而对熔池动态特性进行分析。结果表明, 所提出的方法能够有效改善激光焊过程熔池 X 光图像质量, 突出熔池边缘轮廓特征。

关键词: 激光深熔焊; 熔池图像; 图像退化; 图像恢复

中图分类号: TG456.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2013)02-0001-04



高向东

0 序 言

在激光深熔焊过程中, 可以利用 X 光观测和分析焊件内部熔池形态以及匙孔能量传递效果。熔池 X 光图像含有激光焊的丰富信息, 如匙孔形态、熔池流动状态、匙孔能量传递效果等。与传统焊接技术相比, 大功率光纤激光焊在焊接质量和效率方面都具有明显优势^[1]。由于其焊接速度快、光束功率密度高且存在强烈金属蒸气辐射, 当利用 X 光设备和高速视觉传感器分析熔池特征时, 采集到的熔池 X 光图像往往存在严重退化现象, 清晰度不高, 识别性较差, 难以进行图像特征的分析。虽然已有焊件 X 光观测技术, 如检测焊件内部气孔和裂纹等焊接缺陷, 但 X 光图像清晰度不够高, 仍需进一步提高 X 光图像质量。

以大功率光纤激光焊接 304 不锈钢为试验对象, 研究熔池 X 光图像恢复方法。为便于观察熔池形成过程及特征, 焊接前在 304 不锈钢中放入金属铂颗粒。在焊件的一侧控制 X 射线穿过焊件, 另一侧用高速影像传感器采集 X 光影像。利用 304 不

锈钢与金属铂熔化时在 X 光辐射下的灰度差异来观测焊件熔化过程。针对熔池 X 光退化图像, 采用盲去卷积和维纳滤波法对图像进行滤波恢复, 并用灰度变换增强 X 光图像, 有效提高大功率光纤激光深熔焊熔池 X 光图像质量。

1 试验装置

试验装置包括 IPG YLG-10000 光纤激光焊设备、X 射线发射器、高速摄像机、保护气体和焊接工作台。高速摄像机前设置图像增强器, 以获取最佳的熔池区域 X 光影像, 试验装置结构见图 1^[2]。大功率光纤激光焊试验工艺参数见表 1, 试验材料选用厚度为 5 mm 的 304 不锈钢板, 尺寸为 150 mm × 50 mm × 5 mm, 工作台上夹具将钢板按图 1 所示夹紧。在焊件中段内部嵌入一铂金属颗粒, 随着激光焊的进行, 铂金属颗粒与不锈钢材料熔化, 其 X 光影像由高速摄像机采集并存至计算机。

表 1 焊接试验工艺参数

Table 1 Welding experimental conditions

激光功率	焊接速度	保护气体流量	摄像速率	焊接方式
P/kW	$v/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	$q/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	$F/(\text{f}\cdot\text{s}^{-1})$	
6	2.0	40	500	堆焊

收稿日期: 2011-12-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175095); 广东省自然科学基金资助项目(10251009001000001, 9151009001000020); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20104420110001)

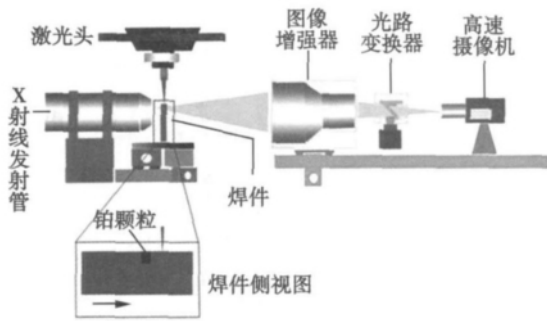


图 1 激光深熔焊试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of laser deep penetration welding experimental set up

2 熔池 X 光图像恢复增强

2.1 图像退化模型

图像恢复一般利用退化现象的先验知识来重建或者复原被退化的图像^[3]。图像恢复将退化图像模型化,再采用逆过程进行处理并复原出原图像。图像退化可以看作是噪声污染的过程,熔池 X 光图像的退化因素主要为射线散射、射线穿透焊件后的能量衰减以及成像系统的噪声干扰。退化过程一般可以表示为

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) + \mu(x, y) \quad (1)$$

式中: $g(x, y)$ 为退化图像; $f(x, y)$ 为原图像; $h(x, y)$ 为退化函数的空间表示; “*” 代表卷积; 在空间域, $h(x, y)$ 为点扩散函数 PSF; $\mu(x, y)$ 为加性噪声。由式(1)可知,图像退化及恢复的关键在于对 $h(x, y)$ 点扩散函数 PSF 的估计和求解。

2.2 盲去卷积获取点扩散函数 PSF

盲去卷积法主要利用退化图像的自身信息后验估计点扩展函数,是以最大似然估计为基础的一种用随机噪声干扰量进行估计的最优化策略。最优化问题采用规定的约束条件并假定收敛时通过迭代求解,得到的最大 $f(x, y)$ 和 $h(x, y)$ 就是还原的图像和 PSF。迭代求解过程为

$$\hat{f}_{k+1}(x, y) = \hat{f}_k(x, y) \left[\frac{h(-x, -y) * \frac{g(x, y)}{h(x, y) * \hat{f}_k(x, y)}}{h(x, y) * \hat{f}_k(x, y)} \right] \quad (2)$$

式中: \hat{f} 为未退化图像的估计; “*” 代表卷积; $\hat{f}_k(x, y)$ 为经 k 次迭代后的未退化图像的估计; $g(x, y)$ 为退化图像; $h(x, y)$ 为退化函数。

以熔池 X 光影像的第 562 帧图像(图 2)为例说明盲去卷积恢复并估计点扩散函数 PSF。采用不同的初始推测尺寸、迭代次数和偏离阈值参数进行反复试验得到最大 $f(x, y)$, 即还原的图像。在对激光

焊接熔池 X 光图像的盲去卷积恢复中,当 PSF 的初始估计为 3×3 的单位矩阵、迭代次数为 10 次且恢复图像与原图像之间的偏离阈值为 0.01 时,能获得较好的恢复效果,如图 3 所示。试验所获得的 PSF 估计值为

$$\begin{bmatrix} 0.1121 & 0.1121 & 0.1121 \\ 0.1134 & 0.1137 & 0.1134 \\ 0.1037 & 0.1078 & 0.1077 \end{bmatrix}$$

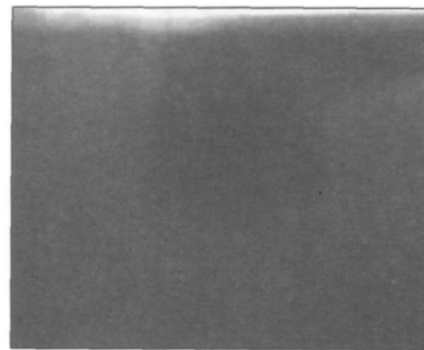


图 2 第 562 帧熔池 X 光图像

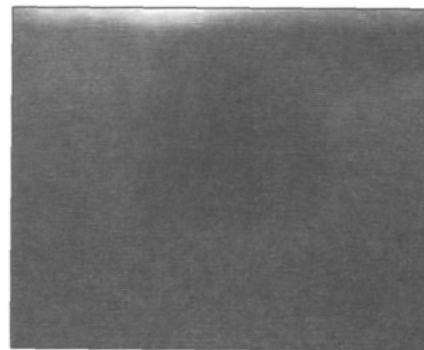
Fig. 2 562th frame X-ray image of a molten pool

图 3 盲去卷积后的第 562 帧熔池 X 光图像

Fig. 3 562th frame X-ray image of a molten pool after blind deconvolution

2.3 维纳滤波恢复

经过盲去卷积恢复可得到点扩散函数 PSF 的有效估计值,以此为参数进一步做维纳滤波恢复。维纳滤波过程可表示^[5]为

$$\hat{f}(u, v) = \left[\frac{1}{|H(u, v)|^2 + S_\eta(u, v) / S_f(u, v)} \right] G(u, v) \quad (3)$$

式中: 在频域内 $H(u, v)$ 为退化函数; $|H(u, v)|^2 = H^*(u, v) H(u, v)$, $H^*(u, v)$ 为 $H(u, v)$ 的复共轭; $S_\eta(u, v) = |N(u, v)|^2$ 为噪声的功率谱, $N(u, v)$ 表示噪声; $S_f(u, v) = |F(u, v)|^2$ 为未退化图像的功率

谱 $F(u, v)$ 为未退化的图像; 比率 $S_{\eta}(u, v)/S_f(u, v)$ 为噪信功率比。

以图2为例进行噪信功率比为常数比例的维纳滤波恢复, 试验结果如图4所示。可以看出, X光图像的视觉效果显著提高, 熔化的铂金属颗粒所在的深色部分与周边不锈钢熔化部分的交界处灰度差更加明显, 边缘特征得到改善, 图像细节得到恢复。

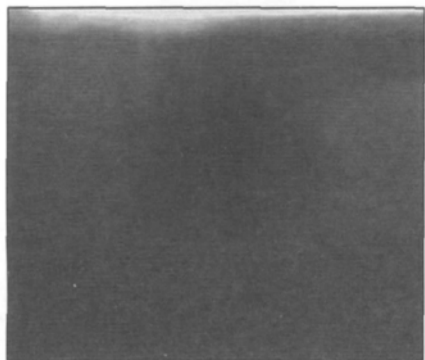


图4 维纳滤波后的第562帧熔池X光图像

Fig. 4 562th frame X-ray image of a molten pool after Wiener filtering

2.4 灰度变换增强图像

经维纳滤波恢复后, X光图像质量得到较大改善, 但X光图像内匙孔的位置和形态特征以及熔化状态铂金属的灰度分布还不够明显。观察0~256范围内熔化的铂金属灰度值, 发现其主要分布在30~60之间, 采用灰度变换将X光图像在区间30~60之间像素点的灰度分布范围拉伸到30~120, 如

$$G_{\text{GMG}} = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{\frac{[g(i, j+1) - g(i, j)]^2 + [g(i+1, j) - g(i, j)]^2}{2}} \quad (4)$$

式中: G_{GMG} 为灰度平均梯度值; M 为图像像素行数; N 为图像像素列数; $g(i, j)$ 为图像第 i 行第 j 列处像素点的灰度值。

$$l_{\text{LS}} = \frac{\sum_{i=2}^{M-1} \sum_{j=2}^{N-1} \left| \begin{array}{c} 8g(i, j) - g(i, j-1) - g(i, j+1) - g(i-1, j) - g(i+1, j) \\ - g(i-1, j-1) - g(i-1, j+1) - g(i+1, j-1) - g(i+1, j+1) \end{array} \right|}{(M-2)(N-2)} \quad (5)$$

式中: l_{LS} 为拉普拉斯算子和; M 为图像像素行数; N 为图像像素列数; $g(i, j)$ 为图像内第 i 行第 j 列处像素点的灰度值。

用式(4)和式(5)分别计算图2、图4和图5的灰度平均梯度 G_{GMG} 和拉普拉斯算子和 (l_{LS})。对比维纳滤波以及灰度拉伸后图像的 G_{GMG} 值和 l_{LS} 值的变化, 计算结果如表2所示。

由表2可看出, 经过维纳滤波后, 图像的 G_{GMG} 值增大了1.18倍, l_{LS} 值增大了1.42倍。经灰度拉伸

图5所示。经过灰度变化后的图像熔池特征更加明显, 边缘特征得到进一步的改善。

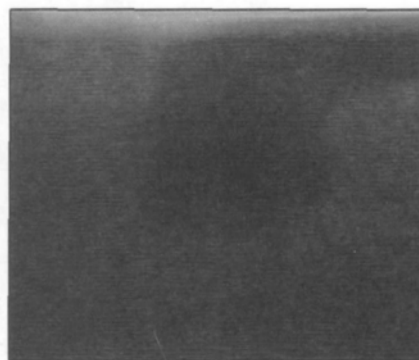


图5 图4的灰度变换效果

Fig. 5 Image after grey transformation of Fig. 4

3 试验结果与分析

3.1 熔池X光图像质量评价

由于熔池X光图像没有原始清晰图像作为参照, 因此对于试验结果, 只能采用无参考图像质量评价方法, 得出一个与人类视觉感知相近的质量分数值。这里采用灰度平均梯度与拉普拉斯算子和对熔池X光图像进行质量评价^[6]。

灰度平均梯度 (gray mean grads, GMG) 是分别将图像长度和宽度方向上的相邻像素灰度值的差求平方和再求平方根, 可较好地反映图像的对比度和纹理变化特征, 其值越大表示图像越清晰, 图像质量越好, 灰度平均梯度可表示为

拉普拉斯算子和 (l_{LS}) 是对每一个像素点在 3×3 的邻域内采用拉普拉斯算子得到8邻域微分值, 然后在图像范围内求和, 表达式为

表2 熔池X光图像处理前后的 G_{GMG} 值和 l_{LS} 值对比
Table 2 Variation of G_{GMG} and l_{LS} of 562th frame X-ray image of a molten pool before and after image processing

	原始图像	维纳滤波后图像	灰度拉伸后图像
G_{GMG}	0.006 1	0.013 3	0.031 2
l_{LS}	0.034 5	0.083 5	0.197 4

后, G_{GMG} 值在维纳滤波恢复的基础上增大了1.34倍, l_{LS} 值也增大了1.36倍。显然熔池X光图像经过

图像恢复和图像增强可有效地提高图像质量。

3.2 熔池形态变化分析

熔池 X 光图像经过恢复后,可分辨出铂金属的边缘轮廓。抽取熔池动态变化较为剧烈的第 538 至第 547 连续 10 帧图像进行分析,如图 6 所示。

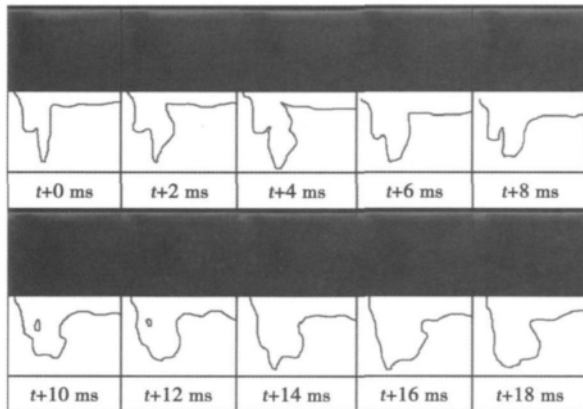


图 6 熔池 X 光图像形态变化分析

Fig. 6 Analysis of X-ray image variation of molten pool shape

从图 6 可以看到铂金属熔化的过程,首先受激光束冲击的铂金属分为两个方向流动,一部分流动到熔池的底部,另一部分直接在熔池近表层向激光束后方流动。随着焊件的进给,铂金属完全被熔化,两个流向之间的部分也逐渐被后来熔化的铂金属熔合,到 $t+44$ ms(对应第 560 帧)熔池基本稳定,最终形成一个类似水勺的形状,如图 7 所示。对冷却稳定后铂金属的分布特征进行分析,发现激光束后方的铂金属分布宽度随焊件深度的变化具有一定的规律,如图 8 所示。

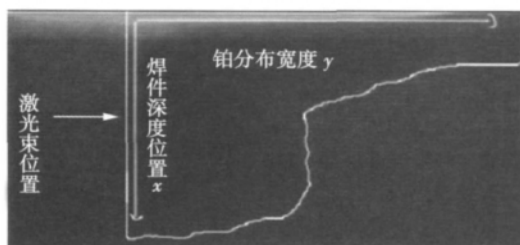


图 7 稳定后的 X 光图像熔池形状

Fig. 7 Steady shape of a molten pool of X-ray image

可以看出,在焊件深度为 0~45 个像素的范围内,激光束后方的铂金属熔化分布宽度最大。随着焊件深度的增加,铂金属熔化宽度逐渐减小,在深度为 80~140 像素范围内趋于稳定。接近熔池底部

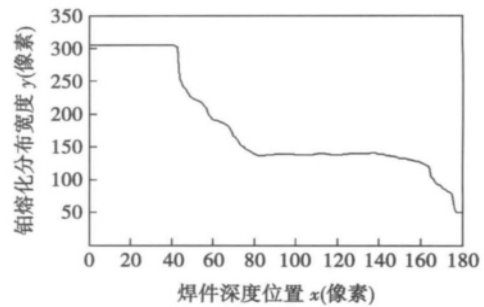


图 8 铂熔化分布宽度随焊件深度变化曲线

Fig. 8 Variation curve of width distribution of Pt molten metal with weldment depth

时,铂金属熔化宽度分布进一步减小。铂金属熔化宽度分布变化较好地反映了熔池的流动状态。

4 结 论

(1) 采用盲去卷积和维纳滤波相结合的算法,可有效恢复激光深熔焊熔池 X 光退化图像,且不依赖先验知识。

(2) 所提出算法可有效增大 X 光图像的 G_{GMG} 和 I_{LS} 值,提高图像质量,改善纹理结构,突出熔池边缘轮廓特征。

参考文献:

- [1] 高向东,游德勇, Katayama S. 大功率光纤激光焊焊缝跟踪偏差测量新方法[J]. 焊接学报, 2011, 32(5): 1-4.
Gao X D, You D Y, Katayama S. An approach for measuring offset of seam tracking during high-power fiber laser welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(5): 1-4.
- [2] Matsunawa A, Seto N, Kim J, et al. Observation of keyhole and molten pool behavior in high power laser welding[J]. Transactions of Joining and Welding Research Institute, 2001, 30(1): 14-16.
- [3] 王明泉,柴黎. 改进的分水岭算法在焊接图像中的应用[J]. 焊接学报, 2007, 28(7): 13-16.
Wang Mingquan, Chai Li. Application of an improved watershed algorithm in welding image segmentation[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(7): 13-16.
- [4] Gallo I, Binaghi E, Raspanti M. Semi-blind image restoration using a local neural approach[J]. Neurocomputing, 2009, 73: 389-396.
- [5] Shacham O, Haik O, Yitzhak Y. Blind restoration of atmospherically degraded image by automatic best step-edge detection[J]. Pattern Recognition Letters, 2007, 28: 2094-2103.
- [6] 王菲. 运动模糊图像的恢复及恢复质量评价[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.

作者简介: 高向东,男,1963 年出生,博士研究生导师。主要从事机电控制等方面的研究工作。发表论文 100 余篇。Email: gaosxd666@126.com

MAIN TOPICS ,ABSTRACTS & KEY WORDS

Restoration and characteristic analysis of X-ray images of molten pool during laser deep penetration welding

GAO Xiangdong¹ , XIANG Junbin¹ , Khalid M. HAFEZ² , Katayama SEIJI³ (1. School of Electromechanical Engineering , Guangdong University of Technology , Guangzhou 510006 , China; 2. Central Metallurgical R & D Institute , Cairo 11435 , Egypt; 3. Joining and Welding Research Institute , Osaka University , Osaka 5670047 , Japan) . pp 1 – 4

Abstract: Owing to a strong ability to go through the objects , the radiography can be used to observe and analyze the formation of a molten pool inside weldments during laser deep penetration welding. The shape of a molten pool and the thermal transfer effect of laser power through keyhole can be monitored and analyzed in real-time. During a high-power fiber laser welding on plate of 304 stainless steel , a high-speed radiography camera was used to capture the molten pool images. These captured X-ray images were degenerated and obscure due to the disturbance and noises from the welding process and radiography devices. An arithmetic to restore and intensify the X-ray images of molten pool was proposed to make the X-ray images more clear and enhance the ability to recognize the characteristics of images. The blind deconvolution method was used to estimate the point spreading function of X-ray image degeneration , which was applied as a parameter to implement the Wiener filtering of X-ray image of a molten pool. Also , the X-ray image of a molten pool was intensified by the grey level transformation , and the dynamic of a molten pool was analyzed. Results showed that the proposed algorithm of image restoration and intensification can improve the quality of X-ray images effectively and make the contour of a molten pool more distinct.

Key words: laser deep penetration welding; X-ray image of molten pool; image degradation; image restoration

Fatigue life prediction of laser-MIG hybrid welded 7075-T6 Al alloy joints

WU Shengchuan^{1,2} , ZHOU Xinmiao¹ , ZHANG Weihua² , YU Xiao¹ , XU Xiaobo¹ (1. School of Materials Science and Engineering , Hefei University of Technology , Hefei 230009 , China; 2. State Key Laboratory of Traction Power , Southwest Jiaotong University , Chengdu 610031 , China) . pp 5 – 8

Abstract: Fatigue crack propagation life of laser-MIG hybrid welded 7075-T6 Al alloy thin plate was investigated , and the relation of heat input and elastic modulus was established by experiments. Moreover , the fatigue life was predicted with different heat input. Based on the improved forman equation , an integrated fatigue life model was formulated with the coupling effect of the property difference , threshold of stress intensity factor , driving force of cracking and residual stress of hybrid welded 7075-T6 joints. This novel model was then validated through real

fracture propagation , tensile tests and finite element simulation. It has been proved that the predicted fatigue life shows a good agreement with experimental results.

Key words: hybrid laser-MIG welding; high strength aluminum alloys; fatigue life; threshold of stress intensity factor; residual stress

Analysis on welded joint of thick Ti-6Al-4V plate by magnetically controlled narrow-gap TIG welding

SUN Qingjie^{1,2} , LI Wenjie¹ , HU Haifeng¹ , LIANG Yingchun² , FENG Jicai¹ (1. Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology , Harbin Institute of Technology at Weihai , Weihai 264209 , China; 2. Mechanical Engineering Mobile Post-doctoral Center , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China) . pp 9 – 12

Abstract: The narrow-gap TIG welding with magnetic control system was used to weld the Ti-6Al-4V alloy of 56 mm in thickness. The mechanical properties of weld bead were tested including tensile strength , impact toughness , and hardness. The results shows that the tensile strength value is higher than that of the filler metal due to the meshing strengthened effect. The stress distribution along the through-thickness direction of the joint determines the highest tensile strength and toughness value in the area nearby the welding center line. The welding stress between surface layer and interlayer makes the tensile strength and toughness value decreased. The surface layer has the medium value without welding stress. The highest hardness value appears in the fusion line at the same position on depth because of the acicular α' .

Key words: titanium alloy; narrow-gap welding; magnetic control arc; mechanical properties

High temperature storage reliability of Cu bonds by ultrasonic bonding with fine copper wire

HANG Chunjin^{1,2} , TIAN Yanhong¹ , WANG Chunqing¹ , ZHAO Jiupeng² (1. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China; 2. School of Chemical Engineering and Technology , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China) . pp 13 – 16

Abstract: The high temperature storage reliability of Cu bonds formed with 20 μm copper wire by ultrasonic bonding process after encapsulation with epoxy molding compounds was investigated. SEM was used to analyze the interfacial microstructure and IMCs on the bonding interface after thermal aging. EDS was used to identify the IMCs compositions. A great amount of Cu/Al IMCs as well as micro-cracks and Kirkendall voids are found on the bonding interface after thermal aging with 9 days at 200 $^{\circ}\text{C}$ and with 9 hours at 250 $^{\circ}\text{C}$. With 16 hours aging at 250 $^{\circ}\text{C}$, the element Sb which is decomposed from the epoxy molding