第18卷 第2期 2018年1月
1671—1815(2018)002-0296-04

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

Vol. 18 No. 2 Jan. 2018
ⓒ 2018 Sci. Tech. Engrg.

引用格式:张俊生, 王明泉, 郭晋秦, 等. 球栅阵列焊点空洞缺陷的数学形态学分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 296—299

Zhang Junsheng, Wang Mingquan, Guo Jinqin, et al. Analysis of void defects in BGA solder joints with mathematical morphology[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(2): 296—299

# 球栅阵列焊点空洞缺陷的数学形态学分析

张俊生[1,2] 王明泉[1] 郭晋秦[2] 楼国红[2]

(中北大学信息与通信工程学院[1],太原 030051;太原工业学院电子工程系[2],太原 030008)

**摘 要** 球栅阵列(BGA)焊点焊接过程中容易产生气泡,形成空洞缺陷,检测时如何自动分析一直是个难题。提出使用 Otsu 算法分割焊球,使用数学形态学中的开闭运算、顶帽变换提取空洞缺陷的技术方案,实现每个焊点空洞缺陷的准确提取和自动分析。实验结果表明,提出的技术方案鲁棒性强,可应用于 BGA 焊点的空洞缺陷检测。

**关键词** 球栅阵列 空洞缺陷 Otsu 算法 数学形态学

**中图法分类号** TP391.4; **文献标志码** A

球栅阵列(ball grid array,BGA)封装芯片采用位于芯片底部的焊球代替常规引脚的方式,获得了封装芯片体积更小、引脚数更多、引脚间距更大、电气性能更优等诸多优点,被广泛应用于大规模集成电路芯片中[1]。BGA 芯片被焊接到电路板上时,焊点隐藏于芯片底部,使用微焦点 X 射线设备来检测其焊接质量[2]。BGA 焊点比较常见的一种缺陷是空洞缺陷,主要由焊接过程中高温状态下产生的气体未能及时逸出而导致,反映在 X 射线图像上表现为黑色焊球区域内出现灰白色区域[3]。空洞缺陷的检测方法是计算空洞区域占焊球区域面积的百分比,如通常认为单个空洞缺陷所占面积不超过焊球面积的 25%、多个空洞缺陷面积总和不超过焊球面积的 20% 就算焊接质量合格[4]。针对如何快速检测空洞缺陷的这个问题,诸多学者展开了研究[5—7]。

数学形态学最初由法国学者马瑟荣和塞拉在 20 世纪 60 年代中期研究多孔介质透气性时提出和创建,起初主要用在二值图像的处理和分析上,后来逐步过渡到灰度图像和彩色图像,现在已经成为图像滤波、图像分割和图像测量等领域中一种非常强大的数学工具[8]。本文以数学形态学为基本工具,对经过 Otsu 阈值分割算法初步处理的 BGA 焊点图像进行再次分析,实现了空洞缺陷的自动分析和判定。

2017 年 5 月 8 日收到 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ240803)、山西省科技攻关项目(20140321010-02,201603D121040-1)和山西省高等学校科技创新项目(2013163)资助

第一作者简介:张俊生(1981—),博士研究生。研究方向:工业 X 射线无损探伤。E-mail:zhangsheng658@qq.com。

## 1 数学形态学

数学形态学通过结构元素去分析图像中的目标形状,基本运算单元为腐蚀和膨胀,在此基础上衍生出其他变换。

### 1.1 腐蚀和膨胀运算

数学形态学的结构元素通常被定义为一个二值矩阵,一般指定矩阵中的某个元素为其原点,形态学运算时不断移动原点去遍历图像上的每一像素,每次遍历时与原点对应的那个像素为待处理像素,其灰度值取决于结构元素限定范围内对应的其他像素灰度值。结构元素的大小和形状可以任意设定,默认原点一般为其几何中心;设定大小时为获得唯一默认原点一般取奇数,如 $3\times3$,$7\times7$ 的矩阵,设定形状时通过指定二值矩阵的 0、1 取值来实现,取 0 表示遍历时该位置的像素不参与运算,取 1 表示该位置的像素参与运算,常见形状有方形、圆形、十字交叉等形状。图 1 为 $3\times3$ 的方形和十字形的结构元素。

$$\begin{bmatrix}1&1&1\\1&1&1\\1&1&1\end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix}0&1&0\\1&1&1\\0&1&0\end{bmatrix}$$

(a)方形结构元素 (b)十字形结构元素

图1 结构元素

Fig. 1 Structuring elements

假设待处理图像为 $f(x,y)$,结构元素为 $B$,则数学形态学的膨胀定义为

$$f_{\mathrm{d}}(x,y) = f(x,y) \oplus B \tag{1}$$

式(1)中,$f_{\mathrm{d}}(x,y)$ 为膨胀后的结果图像。膨胀运算是当 $B$ 在 $f(x,y)$ 中遍历时,原点对应像素的灰度值

由 $B$ 中所有取 1 位置对应像素的灰度最大值决定,最终 $f(x,y)$ 中比 $B$ 小的暗细节被去除,其他暗区域被收缩,整体图像变亮,相当于一个局部最大值运算。

数学形态学的腐蚀定义为

$$f_e(x,y) = f(x,y)\Theta B \quad (2)$$

式(2)中,$f_e(x,y)$ 为腐蚀后的结果图像。腐蚀运算是当 $B$ 在 $f(x,y)$ 中遍历时,原点对应像素的灰度值由 $B$ 中所有取 1 位置对应像素的灰度最小值决定,最终 $f(x,y)$ 中比 $B$ 小的亮细节被去除,其他亮区域被收缩,整体图像变暗,相当于一个局部最小值运算。

### 1.2　开运算和闭运算

数学形态学的开运算定义为

$$f_o(x,y) = f(x,y)\circ B = [f(x,y)\Theta B] \oplus B \quad (3)$$

式(3)中,$f_o(x,y)$ 为开运算后的结果图像。开运算先对 $f(x,y)$ 进行腐蚀运算,再对 $f(x,y)$ 进行膨胀运算,相当于先去除了比 $B$ 小的亮细节,再通过 $B$ 的膨胀去恢复受腐蚀影响的其它灰度,最终运算结果是 $f(x,y)$ 中比 $B$ 小的亮细节被完全去除,比 $B$ 大的亮细节中仅被去掉了不能容纳 $B$ 的部分,其他灰度基本不受影响。

数学形态学的闭运算定义为

$$f_c(x,y) = f(x,y)\cdot B = [f(x,y) \oplus B]\Theta B \quad (4)$$

式(4)中,$f_c(x,y)$ 为闭运算后的结果图像。闭运算先对 $f(x,y)$ 进行膨胀运算,再对 $f(x,y)$ 进行腐蚀运算,相当于先去除了比 $B$ 小的暗细节,再通过 $B$ 的腐蚀去恢复受膨胀影响的其他灰度,最终运算结果是 $f(x,y)$ 中比 $B$ 小的暗细节被完全去除,比 $B$ 大的暗细节中仅被去掉了不能容纳 $B$ 的部分,其他灰度基本不受影响。

### 1.3　顶帽变换

数学形态学的顶帽变换定义为

$$f_{WTH}(x,y) = f(x,y) - f_o(x,y) \quad (5)$$

式(5)中,$f_{WHT}(x,y)$ 为顶帽变换运算的结果。

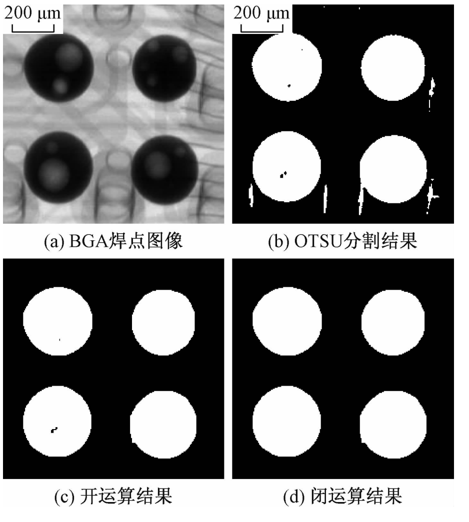
顶帽变换运算是原始图像减去其开运算,结果图像 $f_{WHT}(x,y)$ 中开运算去除掉的灰度部分得以保留,不受开运算影响的部分相减过程中抵消,灰度接近于 0。顶帽变换可以用来提取比结构元素 $B$ 小的亮细节。

## 2　实验过程与结果

BGA 焊点通过微焦点 X 射线检测设备成像时,电路板本身以及芯片内部走线同时也会成像,导致图像结构复杂、对比度低,影响空洞缺陷的自动提取。图 2(a)所示为电路板上 BGA 芯片焊点的局部区域,可以看到图像上除了焊点和空洞缺陷外,还有过孔、走线、芯片内部连线等,这些干扰因素导致很难用单一的方法直接提取缺陷。

### 2.1　焊球区域的提取

BGA 焊点面积较大,灰度较低,在图像直方图上能形成明显的峰值,可以使用全局阈值分割的方法提取出来。Otsu 算法是一种最早由日本学者大津展之提出的阈值分割方法,根据图像的直方图来穷举搜索目标和背景两类像素的最大类间方差,以此为阈值实现目标的提取[9]。Otsu 分割算法对图像中占较大比例的目标提取效果较好,图 2(a)应用 Otsu 算法的分割结果如图 2(b)所示。




(a) BGA焊点图像　(b) OTSU分割结果

(c) 开运算结果　(d) 闭运算结果

图 2　BGA 焊点焊球区域的提取

Fig. 2　Extraction of solder joints in BGA balls

从图 2(b)中可以看到,焊点区域基本被全部提取出来,电路板上的过孔边缘灰度与焊球接近,也被同时提取了出来。焊球区域较大,干扰区域较小且为垂直走向的细条,可以通过数学形态学的开运算来去除。定义 3×11 的方形结构元素,对图 2(b)进行开运算,得到图 2(c),干扰被完全去除。

图 2(b)和(c)中的部分焊球区域有黑色的孔洞,这是由于空洞缺陷区域部分像素灰度取值较高,Otsu 算法分割时被当做背景处理。定义 5×5 的方形结构元素,对图 2(c)进行数学形态学的闭运算,得到的结果为图 2(d)。可以看到,BGA 焊点经过 Otsu 分割、数学形态学开闭运算,被完整地提取出来。

### 2.2　空洞缺陷的提取

BGA 焊点中的空洞缺陷对于整个图像而言所占比例较低,在直方图上形不成明显的峰值,很难直接通过类似于 Otsu 算法等全局阈值分割方法提取出来。但是,空洞缺陷位于黑色焊球区域内,局部对

比度较为明显,可以通过设计与焊球区域大小相当的结构元素进行顶帽变换,凸显空洞区域后再进行阈值分割来实现提取。

图 3(a)为原始图像经过半径为 21 的圆形结构元素顶帽变换后的结果,此处半径 21 指结构元素的原点到结构元素中取 1 元素的最远距离为 21 像素。可以从图中看出,整幅图像的灰度大大降低,小于结构元素的亮区域被较好保留,空洞缺陷区域在暗背景上更加明显。使用固定阈值 5 对图 3(a)进行二值化运算,得到的结果如图 3(b)所示,所有的空洞区域被分割出来,同时焊点外的电路板区域也被分割出来。用图 2(d)与图 3(b)进行逻辑与运算得到图 3(c),可以看到只有焊球内的空洞缺陷区域被保留,焊点外的电路板区域被完全去除,上一步分离出来的焊球区域起到了掩模的作用,去掉了与焊点无关的干扰。

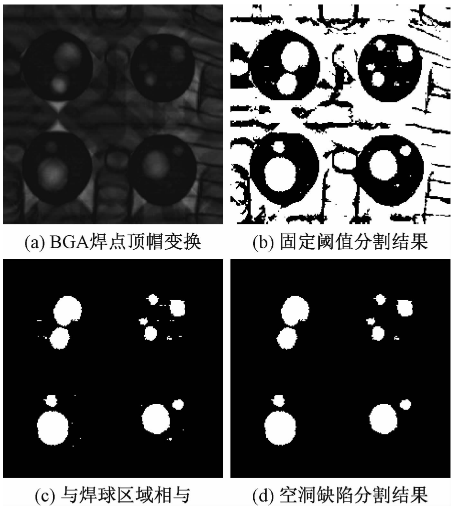

(a) BGA焊点顶帽变换 (b) 固定阈值分割结果
(c) 与焊球区域相与 (d) 空洞缺陷分割结果

图 3 BGA 焊点空洞缺陷的提取

Fig. 3 Extraction of void defects in BGA balls

经过顶帽变换后二值化提取了全部的空洞缺陷区域,但图像中依然存在少量很小的噪声干扰点。定义 3 ×3 的矩形结构元素,对图 3(c)进行形态学开运算,得到的结果如图 3(d)所示。可以看到,不能容纳 3 ×3 的矩形结构元素的噪声干扰点被全部去掉,保留下来的空洞缺陷区域不受影响。

### 2.3 检测结果的标注

将实验过程中第一步提取的焊球区域和第二步提取的空洞缺陷区域以图形的形式直接标注在 BGA 焊点的原始图像上,如图 4 所示。可以直观看到,4 个焊球和各自的空洞缺陷区域均被准确提取。

按图 4 中的焊球编号顺序,以图像中的像素为单位,分别计算焊球面积以及空洞缺陷面积,得到的数据如表 1 所示。4 个焊球的实际面积并不是完全一致,每个焊球内空洞缺陷的个数不同,空洞缺陷的

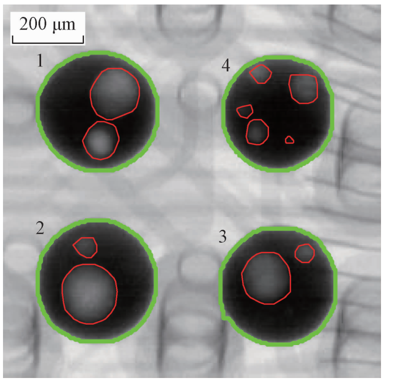



图 4 BGA 焊点缺陷检测的标注

Fig. 4 Label of BGA solder joints defect detection

总面积也不相同,各自的空洞面积比也不一样。按照焊球内存在多个空洞缺陷时缺陷的面积总和不超过焊球面积 20% 的质量检测标准,4 个焊球中仅有编号为 4 的焊球焊接质量合格。

**表 1 BGA 焊点空洞缺陷检测结果**

**Table 1 Detection results of BGA solder joints**

| 焊球编号 | 焊球面积/像素 | 空洞面积/像素 | 空洞面积比/% | 是否合格 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 4 118 | 1 070 | 26. 0 | N |
| 2 | 4 238 | 1 091 | 25. 7 | N |
| 3 | 4 001 | 836 | 20. 9 | N |
| 4 | 3 670 | 557 | 15. 2 | Y |

## 3 结论

BGA 焊点在焊接过程中容易出现空洞缺陷,实际检测过程中需要通过图像分析的方法计算空洞缺陷所占的面积比,然后才能确定焊接质量是否合格。文中使用 Otsu 算法初步分割提取焊球区域,然后用数学形态学中开闭运算修正提取区域,以此区域为掩模模板,与顶帽变换后分割的结果相与提取焊球的空洞缺陷区域,实现空洞缺陷的自动分析,形成一个完整的技术方案,可直接应用于工程实践中。

### 参 考 文 献

1 罗伟承, 刘大全. BGA/CSP 和倒装焊芯片面积阵列封装技术. 中国集成电路, 2009; 18(2):49—55
Luo Weicheng, Liu Daquan. Area array package—BGA/CSP & flip chip. China Integrated Circuit, 2009; 18(2):49—55

2 李 乐. 基于精密微焦点 X 射线的 BGA 焊点缺陷检测关键技术研究. 广州:华南理工大学,2014
Li Le. Key technologies research on BGA solder joint's defect detection based on precision micro-focus X-ray. Guangzhou: South China University of Technology,2014

3 吴 军. BGA 焊点空洞问题分析. 电子工艺技术, 2013; 34(4):223—225
Wu Jun. Analysis and research of solder voids for BGA. Electronics

Process Technology, 2013; 34(4): 223—225

4 何志刚, 梁　堃, 周庆波, 等. 基于 X 射线成像的 BGA 焊接质量检测技术. 电子工艺技术, 2016; 37(1): 32—39
He Zhigang, Liang Kun, Zhou Qingbo, *et al.* BGA soldering quality detection techniques by X-ray imaging. Electronics Process Technology, 2016; 37(1): 32—39

5 Said A F, Bennett B L, Karam L J, *et al.* Automated void detection in solder balls in the presence of vias and other artifacts. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2012; 2(11):1890—1900

6 Peng Shaohu, Nam Hyun Do. Void defect detection in ball grid array X-ray images using a new blob filter. Journal of Zhejiang University Science C (Computers & Electronics),2012; 13(11): 840—849

7 李　乐, 陈　忠, 张宪民. 复杂背景下 X 射线 BGA 焊点气泡检测. 焊接学报, 2015; 36(3): 32—39
Li Le, Chen Zhong, Zhang Xianmin. Void detection of BGA solder joints under complex X-ray imaging background. Transactions of the China Welding Institution, 2015; 36(3): 32—39

8 Soille P. 形态学图像分析原理与应用. 2 版. 王小鹏, 译. 北京: 清华大学出版社, 2008
Soille P. Morphological Image Analysis: Principles and Applications. 2nd Ed. Wang Xioapeng, Translated. Beijing: Tsinghua University Press, 2008

9 Otsu N. A threshold selection method from gray-level histogr-am. IEEE Transactions on System Man and Cybernetic, 1979;9(1):62—66

# Analysis of Void Defects in BGA Solder Joints with Mathematical Morphology

ZHANG Jun-sheng[1,2], WANG Ming-quan[1], GUO Jin-qin[2], LOU Guo-hong[2]

(School of Information and Communication Engineering, North University of China[1], Taiyuan 030051, China;
Department of Electronic Engineering, Taiyuan Institute of Technology[2], Taiyuan 030008, China)

[**Abstract**] In the welding process of BGA solder joints, it is easy to produce bubbles and form void defects which are difficult to analysis automatically during testing. A technique solution is proposed that the solder balls are separated by Otsu algorithm, the void defects are segmented by the open and close operations and the top-hat transform of mathematical morphology. The solution can be used to achieve the seamless extraction of void defects and automatic analysis in each solder ball. The experimental results show that the proposed scheme is robust and can be applied to detection of void defects in BGA solder joints.

[**Key words**] BGA　　void defect　　Otsu algorithm　　mathematical morphology