

基于五探针差分法测量焊点电阻应变

蒋礼¹,周祖锡¹,向可¹,黎辉勇¹,潘毅¹,周子民²

(1.中南大学 物理科学与技术学院,湖南 长沙 410083;

2.中南大学 能源与动力工程学院,湖南 长沙 410083)

摘要: 针对四探针法测量焊点电阻的不足,提出了五探针差分微电阻测量技术。采用四探针法和五探针差分法对试样进行在线测量,并对两种方法采集的数据进行了分析对比。研究结果表明:五探针差分法能够精确测量焊点的电阻,相对四探针法,误差减少了20%~30%。提高了电阻应变的精确度,更能真实反映焊点的蠕变特性。

关键词: 四探针法;五探针差分法;电阻应变

中图分类号: TB302.1;TB302.5

文献标识码: B

文章编号: 1674-7720(2010)11-0076-04

Resistance strain of solder joint measurement based on five probe difference method

JIANG Li¹,ZHOU Zu Xi¹,XIANG Ke¹,LI Hui Yong¹,PAN Yi¹,ZHOU Jie Min²

(1.School of Physics Science and Technology,Central South University,Changsha 410083,China;

2.School of Energy and Power Engineering,Central South University,Changsha 410083,China)

Abstract: The thesis, for the deficiency of four probe measurement in solder joint resistance, has put forward the five probe difference micro resistance measurement technology, sample was measured real time by four probe method and five probe difference method, and then author analyzed and compared the data from above two methods. The results show that five probe difference method can measure resistance of solder joint accurately, error decreases by 20%~30% compared with four probe method. The precision of resistance strain also is increased and characteristic of solder joint creep is reflected truly.

Key words: four probe method; five probe difference method; resistance strain

由于焊点应用于电子产品中,其机械特性与电学特性存在一定的关系^[1]。为此,研究组基于Griffith断裂理论模型^[2-3],建立一个电阻应变与裂纹生长等效模型^[4-5],并利用在线四探针法微电阻测量技术,测试焊点的电阻应变行为来观测剪切蠕变特性^[6]。但是从四探针法测试的结果中包含有紫铜基板的电阻,而且具有与焊点电阻相似的大小,因此不能忽略。本文提出了五探针差分微电阻测试法来克服四探针法测试焊点电阻应变的不足。

1 五探针差分法微电阻测量技术

1.1 四探针法测量焊点电阻的不足

在微小电阻测量领域,四探针法以其简单实用而得到广泛应用,采用四探针法能够有效地减小接触电阻的影响。但是在焊点电阻测试实验中,影响测量结果的不仅仅是接触电阻,还有基板的电阻。基板材料为紫铜,2

片紫铜基板中间夹着焊点。经实际测量,紫铜基板的电阻与焊点电阻数量级别大小相同,因此不能忽略。

1.2 五探针差分法

五探针差分法如图1所示,图中探针1和探针5接恒流源,探针3接电压表,中间是单片机控制的活动开关。 R' 为探针1、2、3、4、5与试样的接触电阻; R_x 为待测焊点电阻; R_{Cu23} 为探针2、探针3之间的铜基板电阻,其值等效于探针3、4之间的铜基板电阻 R_{Cu34} 。 R_x 与 R_{Cu34} 通过恒流 I 时,电压表在单片机的控制下分别测出探针3、4两端的电压 $V1$ 和探针2、3两端的电压 $V2$,然后分别得到探针3、4之间的总电阻和 R_{Cu} 的值。

1.3 原理

在图1中 R_{34} 为探针3、4之间的总电阻,其中包括焊点电阻 R_x ,2个铜基板 R_{Cu34} ; R'_3 、 R'_4 探针3、4与基板

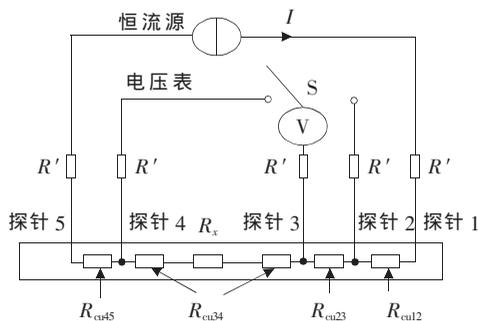


图1 五探针差分法

的接触电阻; R_{23} 为探针2、3之间的总电阻,其中包括用来消除误差的铜电阻 R_{Cu23} ; R'_3 、 R'_4 为探针2、3与基板的接触电阻。

$$\begin{aligned} R_{34}-R_{23} &= R_X+2R_{Cu34}+R'_3+R'_4-(R_{Cu23}+R'_2+R'_3) \\ &= R_X+2R_{Cu34}+R'_4-R_{Cu23}-R'_2 \end{aligned} \quad (1)$$

因为探针与基板接触材料都相同(可以近似看成相等),所以式(1)可简化为:

$$R_{34}-R_{23}=R_X+2R_{Cu34}-R_{Cu23} \quad (2)$$

假设 $2R_{Cu34}-R_{Cu23}$ 等于零,那么测试得到的将是焊点的值,可通过电阻应变反应焊点真实的蠕变。

2 实验

2.1 实验装置简介

该实验装置^[7]由试验装置台、焊点测试仪器、上位机组成。由焊点测试仪器引出的探针采集数据经处理成16进制数后,通过串行通信方式送到上位机再进行数据处理显示并储存,如图2所示。

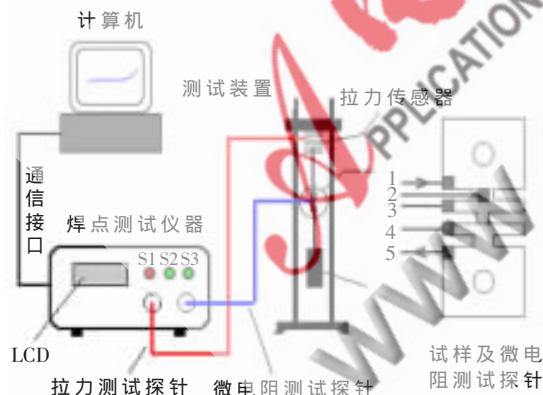


图2 焊点测试实验装置

2.2 实验过程

本实验以Sn3.0Ag0.5Cu焊料制作的截面积 1mm^2 的单个焊点试样为测试对象。外加不同的剪切拉力,室温条件下测试焊点电阻的变化,用电阻应变表示为:

$$\varepsilon_r = \frac{R_t - R_0}{R_0} \quad (3)$$

其中, ε_r 为电阻应变, R_t 为 t 时刻焊点电阻, R_0 为初始焊点电阻。实验样品制作:首先通过多次测量探针3、4之间的铜电阻参数(包括铜的长、宽、厚),取其平均值计算

出铜电阻的值;再测量探针2、3之间的铜电阻参数(宽和厚),铜电阻值必须等于探针3、4之间的值,才能从理论上扣除探针3、4之间多余的铜电阻值,从而计算出探针2的具体位置。然而手动焊的位置不一定准确,在焊装好探针2的位置后再次测量探针2的位置是否与理论计算出的位置相符,而由手动焊引起的位置误差可从软件中扣除。

2.3 实验结果

从数据系统测得的一系列电阻值(电阻应变、剪切拉力等值),通过Origin7.5软件进行处理。本文以Sn3.0Ag0.5Cu为焊点材料,焊点厚度分别以A为0.32mm、B为0.26mm 2个试样为实验值。实验结果如图3~图8所示。

图3所示为A试样在9.8MPa应力作用下,持续剪切蠕变试验时间约44.27min、直至完全断裂的试验过程。四探针法测得A试样的初始电阻、最终电阻值分别为 $135.3\mu\Omega$ 、 $157.1\mu\Omega$ 。五探针法测得A试样的初始电阻、最终电阻值分别为 $104.0\mu\Omega$ 、 $125.8\mu\Omega$ 。最终电阻值应为无穷大,但试样断开后不必继续进行实验,因此,以实验自动终止时刻10s之前采集到的电阻值为最终电阻值。四探针法与五探针法测得A试样的最大电阻应变为:0.16,0.21。

图6所示为B试样在4.9MPa应力作用下,持续剪切蠕变试验时间约196.75min、直至完全断裂的试验过程。四探针法测得B试样的初始电阻、最终电阻值分别为 $111.2\mu\Omega$ 、 $144.6\mu\Omega$ 。五探针法测得B试样的初始电阻、最终电阻值分别为: $80.5\mu\Omega$ 、 $113.5\mu\Omega$ 。四探针法与五探针法测得A试样的最大电阻应变为:0.30,0.41。

3 分析讨论

在图3与图6中,显示了用四探针法与五探针法测得总电阻随时间的变化。从实验数据可以发现用四探针测得的焊点总电阻比五探针测得的焊点总电阻要多出 $30\mu\Omega$ 左右,从上位机数据库中调出的数据发现:在同样的条件下,对A、B试样分别采用四探针法和五探针差分法,测得的焊点总电阻最大差值分别为 $33.2\mu\Omega$ 和 $33.0\mu\Omega$ 。测得的焊点总电阻最小差值分别为 $29.2\mu\Omega$ 和 $29.3\mu\Omega$ 。并且四探针测得的焊点总电阻值整体都比五探针测得的总电阻值高。而A、B试样引进的理论铜基板值分别为 $31.5\mu\Omega$ 和 $30.1\mu\Omega$ 。实验值与理论值基本符合一致,接触电阻也较少。在测量过程中,引进的铜基板值已经很大不能忽略。从A、B试样焊点总电阻随时间变化的曲线图可以看出,铜基板和接触电阻值已经占了采用四探针测得总电阻的20%~30%。而用五探针法测得的焊点电阻已经扣除了铜基板的电阻,接触电阻从理论上讲也基本扣除。所以整个测得的焊点电阻值要少很多,更加接近焊点的真实值,提高了测量的准确性。

在图4与图7中,列出了A、B试样分别在两种测试方法下的电阻应变曲线。反映了与文献资料相类似的

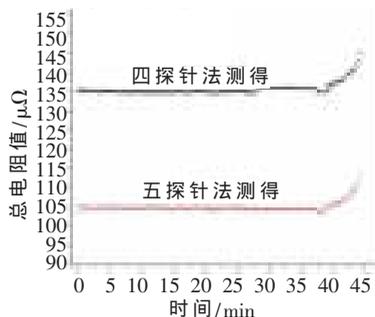


图3 A 试样焊点的总电阻

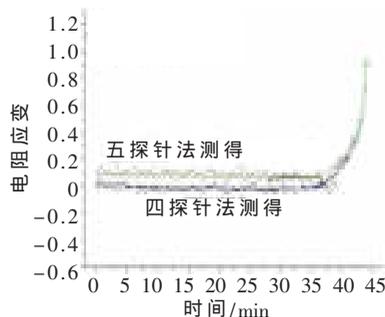


图4 A 试样焊点的电阻应变

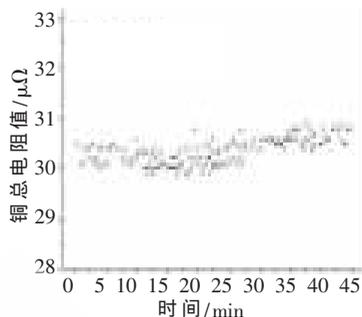


图5 A 试样附加铜基板的电阻值

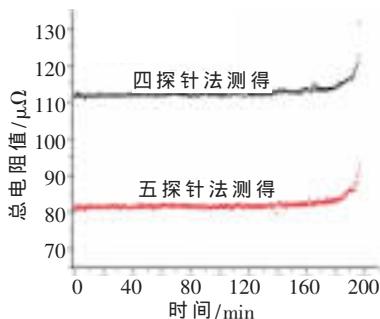


图6 B 试样焊点的总电阻

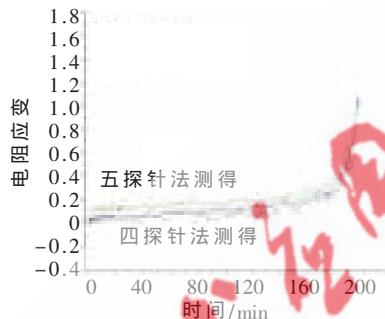


图7 B 试样焊点的电阻应变

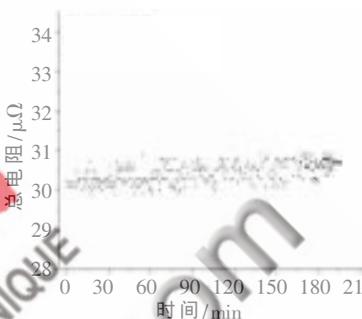


图8 B 试样附加铜基板的电阻值

焊点蠕变^[8-9]、裂纹生长直至完全断裂的过程。经典蠕变曲线分为:(1)蠕变的减速阶段,(2)蠕变恒速阶段,(3)蠕变的加速阶段。电阻应变曲线趋势与经典的蠕变曲线趋势^[2]相一致,特别是与经典蠕变曲线中的第2,3阶段相吻合。

在图4与图7的纵坐标表示的电阻应变都扩大10倍,在第2阶段可以看出五探针法测得电阻应变整体比四探针法测得的高,且基本差值变化不大。根据电阻应变的公式:

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta R}{R_0} \quad (4)$$

可得知 ΔR 越大或者 R_0 越小,则电阻应变越大。 ΔR 包括焊点电阻的变化、探针与铜接触电阻的变化与探针之间附加的铜基板电阻的变化。从以上分析可知接触电阻的变化很少,从图5与图8中,可知铜基板电阻在剪切拉力下的变化也很少,在 $1\sim 2\mu\Omega$ 之内。所以在室温和剪切拉力条件下,无论是四探针还是五探针测量法, ΔR 变化基本相同。另外,在五探针法测量中的 R_0 值少于四探针法所测的值,所以五探针差分法测得的电阻值应变高于四探针法,且能真实反映焊点电阻应变随剪切拉力的变化。在五探针差分法下,焊点电阻应变的真实测量可正确选取电阻应变临界点,从而正确反映了焊点内部的损伤。

虽然在第2阶段五探针法测得的电阻应变值整体高于四探针法测的,但最终两者的趋势一样。这是因为在加速阶段(第3阶段)焊点损伤加剧,并从电阻急剧增大反映出来,即 ΔR 变化很大。而五探针法测的 R_0 小于四探针法测的,且差值基本恒定,但是在加速这个阶段, ΔR 的影响远远大于 $1/R_0$,所以两种方法测的电阻应变整体趋势一致。

铜基板电阻在剪切拉力下基本不变,与其他纯金属一样,铜电阻随温度升高而增加,以恒定质量的铜在 20°C 时的电阻温度系数 α_{20} 作为标准, $\alpha_{20}=0.0093/^\circ\text{C}$ 。此系数通过下面式(5)可计算温度的影响效应^[10]:

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha_{20}(t - t_{20})] \quad (5)$$

式中: R_t 为温度 $t^\circ\text{C}$ 时的电阻, R_{20} 为以 20°C 为基准点的电阻。以实验中的铜基板电阻为例, α_{20} 只能近似取 $0.0093/^\circ\text{C}$,因为国际电工委员会规定在 20°C 时,比重为8.89,长度为1m,截面积为 1mm^2 ,电阻温度系数为0.0093的退火软铜的电导率为100%。而试验中的铜基板截面积为 1mm^2 ,长度为1mm。通过近似计算, $R_{20}=29.8\mu\Omega$ 。现在假设是 100°C ,那么铜在该温度下的电阻为 $51.9\mu\Omega$ 。相比 20°C 时的铜基板电阻变化了 $21.1\mu\Omega$,将近是焊点电阻的25%(这么大的误差是不能忽略的)。在降温情况下,铜电阻也变化很大,且线性减少,经大量实验证明焊点电阻随温度的变化是非线性的。四探针法测的总电阻变化如下:

$$\Delta R_{\text{总}} = \Delta R_{\text{焊点}} + \Delta R_{\text{Cu}} \quad (6)$$

从上面计算可以看出铜电阻变化量占了总电阻变化的很大部分,而且在升降温条件下,铜基板电阻与焊点电阻的变化规律不相同。焊点电阻的变化包括两部分:(1)在升降温条件下,焊点材料导电率的变化是可逆的;(2)焊点内部受损,产生微裂纹,致使导电面积发生变化,且不可逆。如果以四探针法得到电阻应变来表示焊点损伤电阻的变化,那么得到的结果就不正确了。因此四探针法有一定的局限性。而用五探针差分法就能很好地消除这种误差。

技术与方法 Technique and Method

(1)五探针差分微电阻测量技术扣除了附加的铜基板电阻,能减少探针与铜基板的接触电阻。提高了测量焊点电阻应变的准确性,真实反映焊点在剪切拉力下的变化。

(2)五探针差分法在微电阻测量里,对扣除由铜基板而引起的测量误差具有一定的适用性。虽然在本实验中附加的铜基板电阻对实验结果的影响不是很关键,但是在其他条件下(如湿热,振动等)则对试验结果的影响就很大。如果运用五探针差分法,则能扣除铜基板电阻在湿热等条件的变化。

(3)差分法在测量中具有推广性。很多材料在一定环境条件下的测试中,并且这种环境条件对量具(用于材料测试)产生作用,而这种作用对材料的测量结果有一定影响甚至影响结果的正确性,这时运用差分法这种思路就能很好地解决问题。

(4)在室温和剪切拉力下,铜基板电阻基本不变。虽然五探针差分法测的焊点电阻少于四探针法测的,但是两种方法测的焊点总电阻和电阻应变随时间变化的趋势都一致,且与经典蠕变曲线中的第2、3阶段变化趋势一致,但都需要进一步提高测试系统的精度及信噪比。

参考文献

[1] BUDYNAS, RICHARD G. Advanced strength and applied stress analysis (Second Edition)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.

[2] 冯端,吴希俊,孔庆平,等.金属物理学(第三卷):金属力学性质[M].北京:科学出版社,1999.

[3] SURESH S.材料的疲劳[M].王光中,译.北京:国防工业出版社,1993.

[4] 蒋礼,杨科灵,周子民,等.在线测量 Sn-3.5Ag 焊点蠕变的电阻应变[J].中南大学学报,2008,39(1):80-85.

[5] 杨科灵.剪切蠕变下锡银焊点的电阻应变特性研究[D],长沙:中南大学,2007.

[6] JIE Z, MIYASHITA Y, MUTOH Y. Fatigue crack growth behavior of 96.5Sn-3.5Ag lead-free solder [J]. International Journal of Fatigue, 2001,23:723-731.

[7] 蒋礼,向可,杨科灵,等.无铅焊点蠕变电阻测试系统的研制[J].传感器与微系统,2008,27(9):89-92.

[8] MULUGETA, ABTEW, SALVADORAN G. Lead-free solder in electronics[J]. Mater Sci Eng, 2000,27:95-141.

[9] ZENG K, TU K N. Six cases of reliability study of Pb-free solder joint in electronic packaging technology[J]. Mater Sci Eng, 2002,38:55-105.

[10] WEST E G.铜和铜合金[M].陈北盈,涂远军,译.长沙:中南工业大学出版社,1987.

(收稿日期:2009-11-03)

作者简介:

蒋礼,男,1957年生,教授,主要研究方向:电子器件的介观尺度效应,电子封装热可靠性和电子测量。