

分段加热对废旧线路板熔焊影响的数值模拟

张秋霞^{1a,b}, 张承龙^{1a,b}, 王景伟^{1a,b}, 符永高²

(1. 上海第二工业大学 a. 资源与环境工程学院; b. 上海电子废弃物资源化协同创新中心, 上海 201209;
2. 中国电器科学研究院股份有限公司, 广州 510663)

摘要: 近年来电子产业发展正存在着消耗量大、消耗快速、浪费严重等不利情况。在电子废弃物中, 废旧手机芯片仍具有一定的剩余寿命, 拥有较高的再利用价值。因此在废旧手机的拆解过程中提高拆解效率以及降低对芯片的损害是十分有必要的。针对废旧手机线路板上电子元器件拆解过程中常见的熔焊问题, 以空气为加热介质, BGA 返修台为加热的工具, 并采用 FLUENT 软件进行模拟研究。分析对比了不同预热温度、保温时间和高温加热条件下焊点熔化对于芯片拆卸效果的影响。研究表明, 当预热温度为 433 K, 保温时间为 40 s, 高温加热温度为 513 K 时, 拆卸效果最好。

关键词: 废旧线路板; 分段加热; 熔焊; 数值模拟

中图分类号: X705

文献标志码: A

Desoldering of Waste PCBs Heated by Segmented Heating Based on Numerical Simulation

ZHANG Qiuxia^{1a,b}, ZHANG Chenglong^{1a,b}, WANG Jingwei^{1a,b}, FU Yonggao²

(1a. School of Resources and Environmental Engineering; 1b. Shanghai Collaborative Innovation Centre for WEEE Recycling, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China; 2. China National Electric Apparatus Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 5106631, China)

Abstract: In recent years, there are some disadvantages in the development of electronic industry, such as large consumption, rapid consumption, serious waste and so on. Among the electronic wastes, waste mobile phone chips still have a certain residual life and have high reuse value. Therefore, it is very necessary to improve the disassembly efficiency and reduce the damage to the chip in the disassembly process of waste mobile phones. Aiming at the common welding problems in the disassembly of electronic components on the circuit board of waste mobile phones, taking air as the heating medium, BGA repair bench as the heating tool, FLUENT software is used for simulation research. The effects of solder joint melting on chip disassembly under different preheating temperature, holding time and high temperature heating conditions are analyzed and compared. The results show that the disassembly effect is the best when the preheating temperature is 433 K, the holding time is 40 s and the high temperature heating temperature is 513 K.

Keywords: waste printed circuit boards; sectional heating; desoldering; numerical simulation

收稿日期: 2021-08-10

通信作者: 张承龙 (1975-), 男, 江苏昆山人, 教授, 博士, 主要研究方向为固体废物资源化。E-mail: clzhang@sspu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2018YFC1902300) 资助

0 引言

随着通信技术的发展,手机的报废量也随之增长,因此如何处理废旧手机已经是个不容忽视的问题。对废弃手机进行有效地回收与循环利用有利于节约资源和保护环境^[1]。废旧手机中的塑料外壳、显示屏、线路板、锂电池等都具有较高的回收价值,其中线路板不仅含有丰富的贵金属还有许多可以再利用的元器件。

脱焊是拆解废旧线路板的关键步骤之一,主要方式^[2]有:热拆解、化学腐蚀、溶解焊锡和电镀^[3]等。热拆解^[4]的工艺简单,对环境的危害较小,在无损拆解和节约成本方面具有良好的效果,是目前主要的拆解手段之一。

吴国清等^[5]设计了一种无损拆解装置,具有拆解效率高和自动化程度较高等优点,但是工作温度较高,易对环境造成污染。高鹏等^[6]通过正交试验和BP神经网络技术降低工作温度,但加热时间过长容易对线路板上的元器件造成损害。Chen等^[7]设计了一种自动分解设备,利用空气加热来拆解线路板缩短了加热时长。本文进一步优化了加热参数,降低加热温度并减少加热时长,减少拆卸过程对芯片的损害。

分段加热法是指在废旧电路板拆解过程中使用不同的温度条件进行芯片的拆除,将熔锡过程中对芯片的不利影响降至最低。因此如何进行不同温度段的选取就成了芯片拆除过程的关键。现如今针对分段加热方式对线路板进行拆解的研究较少。计算流体力学(CFD)能模拟较复杂的实验过程,且成本较低。因此本文采用CFD数值模拟方法对于线路板拆解过程进行了研究,通过细化不同的预热温度及时间,探究了分段加热法对于废旧电路板芯片拆除的影响,并利用实验加以佐证。

1 分段加热拆解线路板的数值模拟方法

1.1 物理模型的建立

本文以废旧手机的线路板为实验对象,利用球栅阵列封装(ball grid array package, BGA)返修台进行热风脱焊以拆除线路板上的元器件。如图1所示,将线路板固定在BGA返修台上,上下部风嘴喷出细致热气流聚集在元器件表面,热量以热传导的方式

从元器件、基板传递到焊球表面,焊球受热熔化达到脱焊的效果。

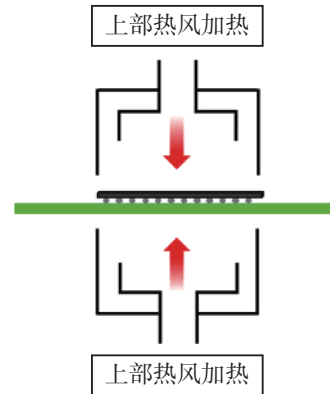


图1 BGA返修台工作示意图

Fig. 1 Working diagram of BGA repair table

手机线路板上的元器件主要是以贴装元件为主,其集成电路的封装方式中较为常见的有BGA、方形扁平无引脚封装(quad flat no-lead package, QFN)和栅格阵列封装(land grid package, LGA)^[8]。本文仅针对BGA封装方式进行研究,建立的二维几何模型如图2所示。

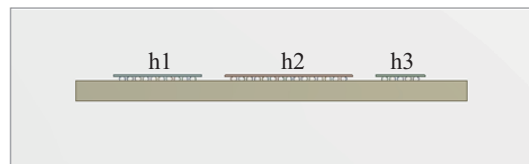


图2 几何模型

Fig. 2 Geometric model

几何模型的外部框架是一个尺寸为40 mm×12 mm的虚拟加热环境,基板的尺寸为30 mm×1.5 mm。在基板上放置了3块大小不同的芯片。根据手机型号华为P9拆卸下来的芯片尺寸建立模型。第1块芯片覆盖10个焊点,其尺寸大小为6.75 mm×0.15 mm;第2块芯片覆盖15个焊点,其尺寸大小为9.75 mm×0.15 mm;第3块芯片覆盖5个焊点,尺寸是3.75 mm×0.15 mm。焊球的形状设置为椭圆形,焦点间距为0.15 mm,长0.45 mm,宽0.3 mm,相邻焊点间距设置为0.15 mm。3块芯片分别命名为h1、h2和h3。

1.2 控制方程

焊球熔化过程存在相变,本文采用“焓-多孔度(enthalpy-porosity)”的计算方式,这是模拟相变材料熔化和凝固的有效方法。物质的焓是显焓 h 与潜热

H 之和 [9]:

$$H = h + \Delta H \quad (1)$$

$$h = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p dT \quad (2)$$

式中: h_{ref} 为参考焓, J/kg ; T_{ref} 为参考温度, K ; c_p 为比定压热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

可用相变材料的潜热来表示潜热值:

$$\Delta H = \beta L \quad (3)$$

式中: L 为相变潜热, J/mol ; β 为液相分数, 可定义为

$$\beta = \begin{cases} 0, & T < T_s \\ 1, & T > T_s \\ \frac{T - T_s}{T_1 - T_s}, & T_s < T < T_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: T_s 为相变材料的固相温度, K ; T_1 为相变材料的液相温度, K ; T 为材料温度, K 。潜热值在固相和液相之间变化。

凝固/融化模型中的能量方程可以写成

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (5)$$

式中: H 为焓, J ; ρ 为密度, kg/m^3 ; \mathbf{v} 为流速, m/s ; k 为湍流动能, J ; T 为材料温度, K ; S 为源项。

流体在流动过程中视为不可压缩的湍流运动, 还应满足以下控制方程 (连续性方程、动量守恒方程和标准 $k-\varepsilon$ 湍流方程):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

式中: u 、 v 、 w 为速度矢量在 x 、 y 、 z 方向上的分量。

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w w)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \quad (9)$$

式中: p 为微元流体上的压力, N ; τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{xz} 为作用在微元体表面上的黏性力 τ 的分量, N ; F_x 、 F_y 、 F_z

为微元体在各方向上的力, N 。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (11)$$

式中: G_k 为层流速度梯度产生的湍流动能, J ; G_b 为浮力产生的湍流动能, J ; Y_M 为可压缩湍流中过度扩散产生的波动, J ; C_1 、 C_2 、 C_3 为常量; σ_k 和 σ_ε 为湍流动能 k 和耗散率 ε 对应的 Prandtl 数; S_k 和 S_ε 由用户自定义。

1.3 边界条件

几何模型的上下边界出热风设置为速度进口。加热环境为非封闭空间, 因此将左右边界设置为压力出口, 作为虚拟边界。根据文献 [10] 中取流体速度为 6 m/s , 流速均匀分布, 初始温度为环境温度 300 K 。

1.4 物性参数

空气作为加热介质, 将热量传递到线路板表面, 再通过热传导使焊点受热熔化。空气各参数随着温度变化情况如表 1 所示。

表 1 空气各参数随温度变化关系 [11]

Tab. 1 Relationship between air parameters and temperature [11]

T/K	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$c_p/[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$	$\lambda/[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$
293	1.15	1 013.21	0.025 2
323	1.06	1 017.39	0.027 2
373	0.92	1 021.58	0.030 7
393	0.87	1 025.77	0.031 6
413	0.83	1 025.77	0.033 3
433	0.79	1 029.95	0.034 4
453	0.76	1 034.14	0.035 7
473	0.72	1 034.14	0.037 0
523	0.65	1 034.14	0.037 0
573	0.60	1 042.51	0.039 8

芯片的密度为 $2 330 \text{ kg}/\text{m}^3$, c_p 为 $810 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, λ 为 $150 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; 基板材料的密度 [11] 设置为 $1 859 \text{ kg}/\text{m}^3$, c_p 为 $1 050 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, λ 为 $0.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。焊点采用的材料为 Sn63Pb37 的共

晶焊锡^[13], 其熔点为 456 K, ρ 为 8 218 kg/m³, c_p 和 λ 随温度变化情况如表 2 所示。

表 2 焊点参数随温度变化关系^[11]

Tab. 2 Relationship between solder joint parameters and temperature^[11]

T/K	$c_p/$ [J · (kg · K) ⁻¹]	$\lambda/$ [W · (m · K) ⁻¹]
298	176	48
456	176	48
457	238	25
523	238	25

2 结果分析

2.1 直接加热结果分析

在处理废旧线路板的过程中, 温度是影响污染物排放的重要因素。当工作温度超过 523 K 时, 易产生有利于合成二噁英的成分和有毒有害气体^[14], 造成环境污染, 因此加热温度不宜过高。实验中直接加热温度低于 503 K 时, 利用 BGA 返修台难以拆卸线路板上元器件。因此为了便于对照, 将线路板直接用高温加热, 加热温度分别为 503、508、513、518 和 523 K。

由图 3 可知, 在 456 K 之前焊点处于升温状态, 达到熔点时处于平台区, 熔化后焊点继续升温。焊点整体的升温趋势符合典型焊点熔化曲线。图 4 为线路板在加热 70 s 时的温度场情况, 此时芯片 h1 下的焊点温度即将达到熔点温度; 芯片 h2 下的焊点尚未达到熔点温度, 需要继续加热; 而芯片 h3 下的焊点已经达到熔点温度, 即此时可以进行芯片拆卸。

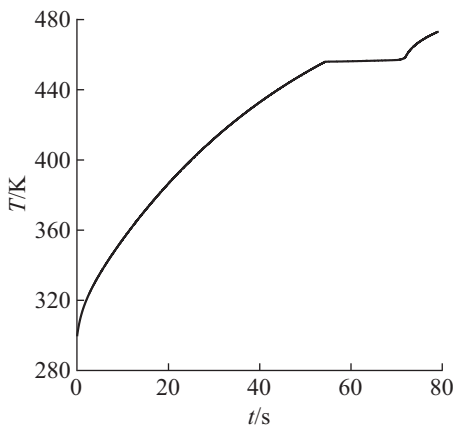


图 3 加热温度为 523 K 时 h1 覆盖焊点的升温情况
Fig. 3 Temperature rise of h1 covered solder joints at heating temperature of 523 K

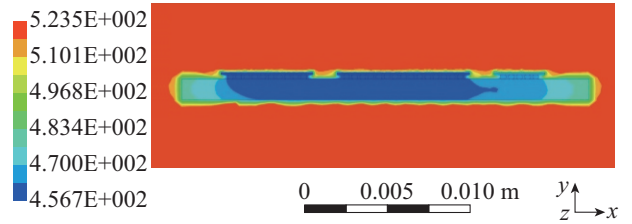


图 4 加热 70 s 时的温度场
Fig. 4 Temperature field of heating for 70 s

由图 5 可见, 在每块芯片覆盖的焊点中均匀设置 5 个监测点, 拆卸芯片所需的时间为其覆盖焊点熔化所需要的时间, 为了准确表示结果, 取值为 5 个焊点所监测到的平均值。由图 6 可见, 随着加热温度的升高, 焊点熔化所需的时间越少, 但呈非线性趋势, 加热初始设置温度越高, 各芯片下焊点熔化所需时间越接近。当加热温度高于 518 K 时, 曲线斜率减小, 说明温度再升高对加热效率的影响很有限。小尺寸芯片比大尺寸芯片熔焊时间短, 但 3 条曲线的趋势相同。



图 5 焊点监测点位置
Fig. 5 Position of solder joint monitoring point

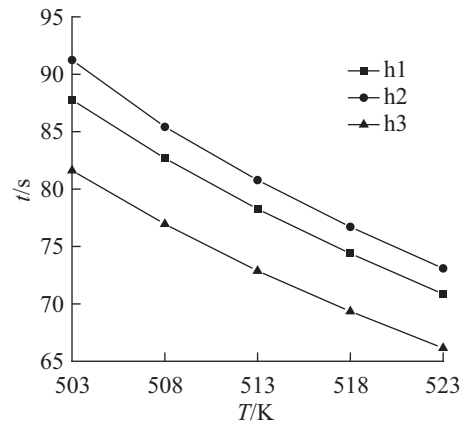


图 6 直接加热对焊点熔化时间的影响
Fig. 6 Effect of direct heating on melting time of solder joint

2.2 分段加热结果分析

分段加热分为低温预热和高温加热两部分。低温预热温度过低或超过焊点熔点 456 K 时难以比较预热效果, 因此根据实际拆卸芯片情况将低温预热的温度划为 393、403、413、423、433、443、453 和 463 K。以 523 K 高温直接加热拆卸芯片时需要 70 s, 因此保温时间不能太长, 否则无法体现分段加热缩短加热时长的优势, 所以将保温时间设为

20、30、40、50 和 60 s。高温加热温度与直接加热部分一致。

由于线路板和元器件的热容值不同, 设置的预热温度不宜过高, 否则升温过快产生的热冲击会造成损伤, 导致芯片内部出现挤压拉扯甚至裂纹。设置保温时间可以减少各部分的温差, 去除焊锡表面部分的氧化物质, 降低焊点的表面张力, 同时使芯片下的各焊点受热均匀, 避免受热不平衡导致拆卸时间延长 [15-16]。

本文模拟了各参数下废旧线路板熔焊需要的时间, 当芯片覆盖的焊点达到熔点温度时视为可以将芯片拆卸。当预热温度为 393 K, 保温时间为 20 s、60 s 时, 通过比较 3 块尺寸不同的芯片在各高温加热温度下的熔焊时间, 发现芯片尺寸越大, 熔焊需要的时间越长 (见图 7)。图 7 中的保温时间跨度较大, 但是 3 块芯片的熔焊趋势是类似的, 因此在后续的分析中仅以 h1 为例, 探究不同加热参数对焊点熔化情况的影响。

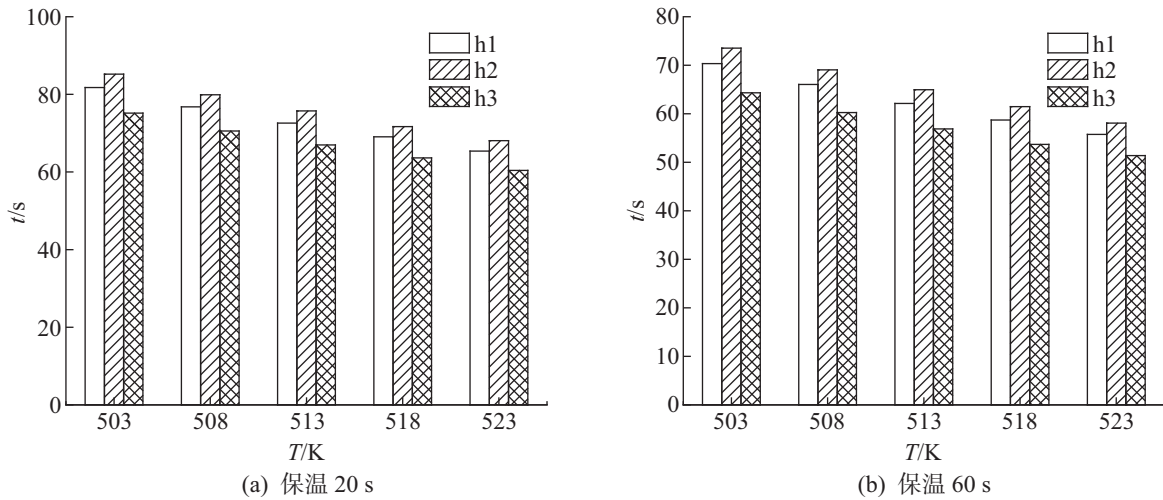


图 7 分段加热熔焊过程中芯片高温受热情况

Fig. 7 High temperature heating of chip during segmented heating fusion welding

2.3 不同预热温度对于焊点熔化情况的影响

将 h1 的实验结果进行细化分析, 从图 8 可以看出预热温度越高, 芯片在拆卸过程中受高温加热的温度越少。当保温时间较短且高温加热温度较低时, 预热温度在分段加热方式中作用有限, 改善效果并不明显。当保温时间较长时, 预热温度越高, 拆卸芯片时高温受热的温度越接近。从图 8(e) 可以看出, 当预热温度超过 433 K 时, 提高预热温度对于芯片高温受热的温度减小变得不明显。此时再升高预热温度, 能耗较大改善效果较小, 因此可以认为 433 K 是效果最好的预热温度。

2.4 不同保温时间对于焊点熔化情况的影响

为了更加详细地比较各参数之间的变化, 将预热温度为 433 K 时的加热数据进行比较。从图 9 可以看出随着保温时间的增加, 高温受热的温度减少, 总加热时长增加。当保温时间小于 40 s 时, 保温时间越长, 芯片在拆卸过程中高温受热的温度几乎呈线性减少, 同时总拆卸时长随之增加。当保温时间

大于 40 s 时, 保温时间越长, 芯片高温受热温度减少趋势减缓, 总拆卸时间上升趋势增长。且随着高温加热温度的升高, 保温时间在拆卸过程中的作用不再明显, 此时高温加热的温度对于焊点熔化情况的影响更大。

2.5 不同高温加热温度对于焊点熔化情况的影响

将预热温度为 433 K、保温时间为 40 s 作为加热参数, 以不同的高温加热温度进行实验, 将模拟结果与实验结果进行比较。为了减小实验与模拟的误差, 将模拟中的分段温度到高温加热温度的升温过程进行了细化。

如图 10 所示, 通过模拟结果与实验对比, 可以得到当温度低于 513 K 时芯片拆解过程中受高温加热的温度影响较长; 当温度大于 513 K 时, 随着温度的升高, 拆解时间降低的并不明显, 且预热温度与高温加热温度的温差越大, 对芯片的损害也越大, 因此最佳拆解温度为 513 K, 拆解时间为 67 s。

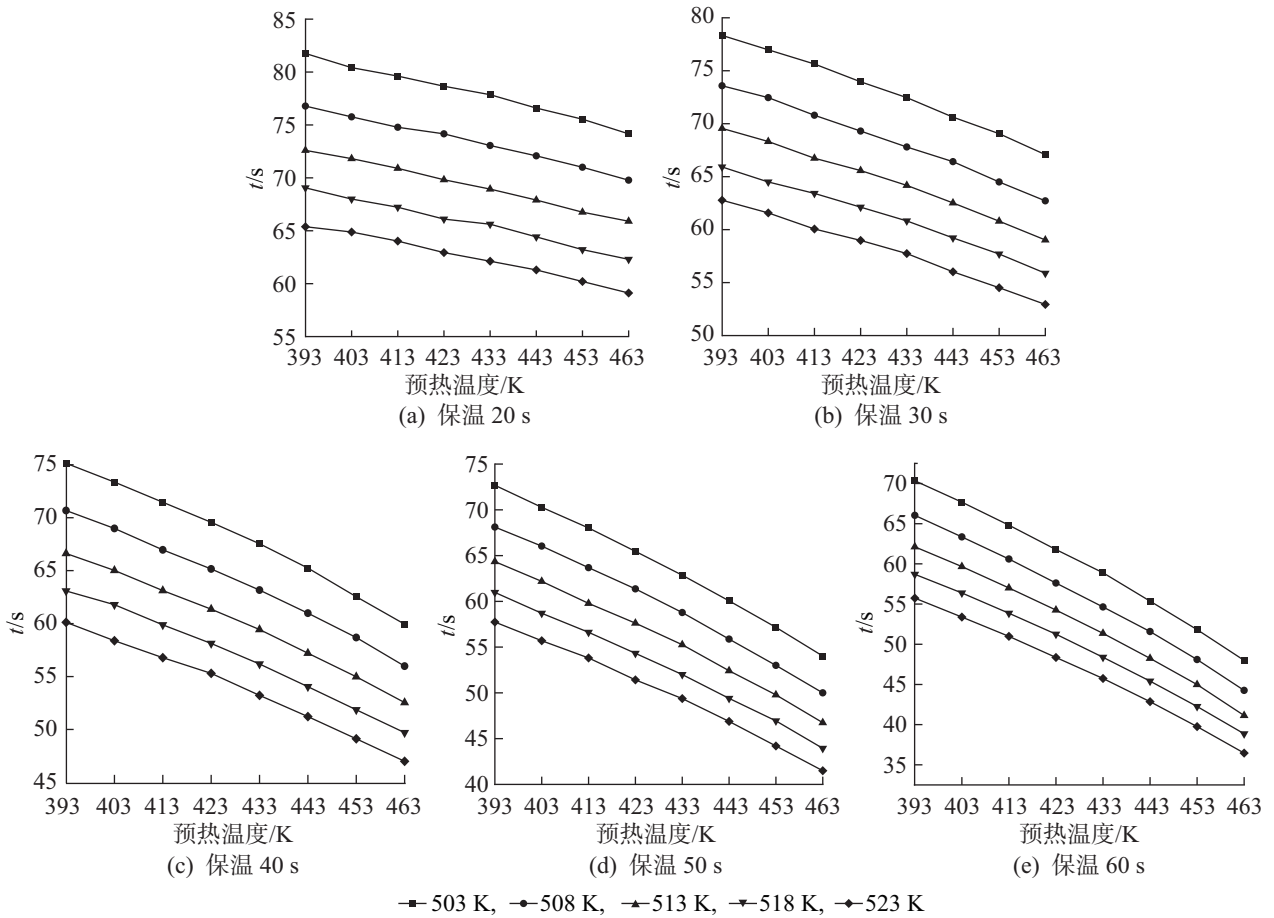


图8 各保温时间下不同预热温度对于焊点熔化时间的影响

Fig. 8 Influence of different preheating temperature on desoldering under different holding time

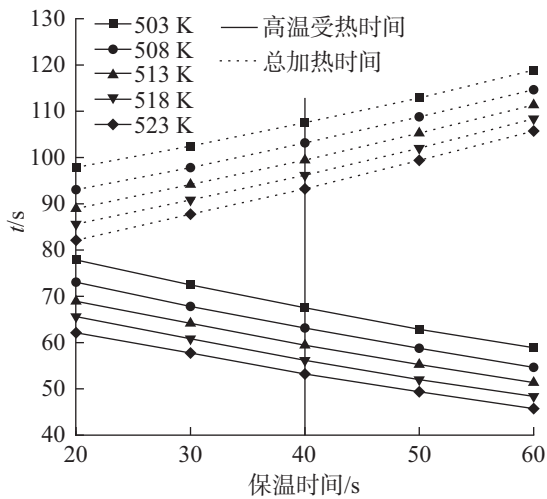


图9 预热温度为433 K时不同保温时间对于焊点熔化情况的影响

Fig. 9 Effect of different holding time on melting of solder joint at 433 K preheating temperature

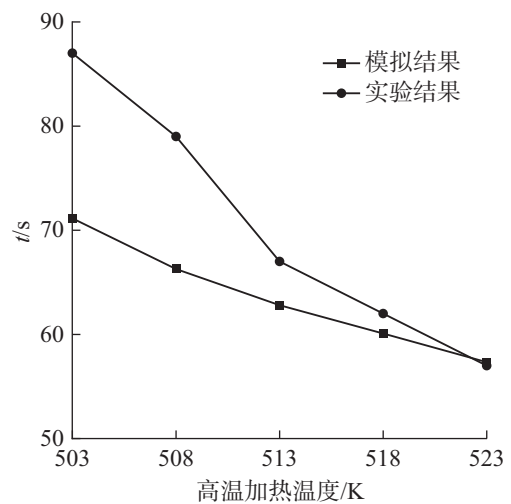


图10 不同高温加热温度下模拟与实验结果的比较

Fig. 10 Comparison of simulation and experimental results at different heating temperatures

图11为不同高温加热温度下拆卸后芯片的外观情况, 经过对比发现: 拆卸温度在503 K和508 K时有缺失焊点现象; 拆解温度在518 K和523 K时出现连焊现象较多, 黏连小元器件; 拆卸温度在

513 K时芯片和焊点的外观完整。

模拟结果与实验结果存在一定偏差, 最大偏差为18.22%, 其原因在于利用BGA返修台拆卸时, 人为不能准确判断焊点熔化的状态, 只能以拆卸芯片

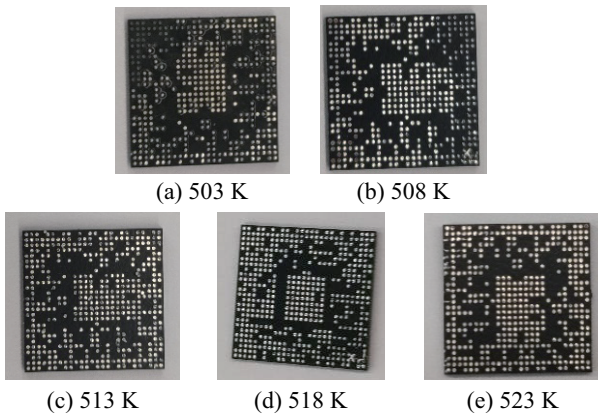


图 11 不同高温加热温度拆卸后芯片外观

Fig. 11 Chip appearance after disassembly at different high temperature heating temperatures

需要的时间来确定, 其中存在人为操作引起的时间差。在预热温度上升到高温加热温度的过程中芯片也在持续受热, 因此高温加热温度越高, 实验结果与模拟结果越接近。当高温加热温度超过 513 K 时温度模拟结果与实验结果已经十分接近, 偏差仅为 6.26%, 因此本模拟实验具有参考性。

3 结 论

本文通过数值模拟和实验验证相结合的方法研究了分段加热用于拆卸废旧线路板时的影响, 通过模拟和实验结果可以对比分析出以下结论:

(1) 通过分段加热拆卸废旧线路板上的芯片, 可以使焊点和芯片受热更加均匀, 拆卸效果明显优于直接高温加热。解决了短时间迅速升温产生的热冲击对芯片造成的损伤, 降低热疲劳失效风险。分段加热可以解决由于材料热膨胀系数不同而导致的芯片内部断裂问题以及拆卸对芯片的损害, 有利于提高旧芯片的再利用率。

(2) 当预热温度为 433 K、保温时间为 40 s、高温加热温度为 513 K 时拆卸效果最好。在此加热参数下, 拆卸后的芯片和焊点外观完整, 同时减少了芯片高温受热的的时间, 也降低了拆卸过程中的能源损耗。

(3) CFD 有助于焊点在不同参数下熔焊情况的

研究, 节约实验成本。模拟结果与实验结果的偏差为 6.26%, 具有较高的工程研究意义。

参考文献:

- [1] 王立, 沈志刚. 废印刷电路板元器件拆除技术综述 [C]//中国颗粒学会第七届学术年会暨海峡两岸颗粒技术研讨会论文集. 西安: 中国颗粒学会, 2010: 498-505.
- [2] 杨继平, 向东, 高鹏, 等. 印制电路板拆解技术与拆解工艺综述 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(9): 126-135.
- [3] STENNETT A D, WHALLEY D C. Novel rework techniques for electronic assemblies [C]//Electronics Packaging Technology Conference. [s.l.]: [s.n.], 196-201.
- [4] 郑磊. 浅析废线路板污染及防治措施 [J]. 再生资源与循环经济, 2019, 12(7): 13-16.
- [5] 吴国清, 张宗科, 吴超童, 等. 废弃线路板无损拆解技术研究 [J]. 家电科技, 2009(16): 54-55.
- [6] 高鹏, 向东, 杨继平, 等. 应用遗传算法的线路板拆解加热参数优化 [J]. 现代制造工程, 2008(8): 92-95.
- [7] CHEN M J, WANG J B, CHEN H Y, et al. Electronic waste disassembly with industrial waste heat [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(21): 12409-12416.
- [8] 侯海亭, 郭天赐, 李南极. 智能手机维修从入门到精通 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2014: 49-51.
- [9] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 290-298.
- [10] 刘国勇, 张少军, 朱冬梅, 等. 废线路板电子元器件高效拆解熔焊效率影响因素研究 [J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(4): 596-601.
- [11] WANG B, YI S. Dynamic plastic behavior of 63 wt% Sn 37 wt% Pb eutectic solder under high strain rates [J]. Journal of Materials Science Letters, 2002, 21(9): 697-698.
- [12] 张少军, 李新新, 刘国勇, 等. 基于 FLUENT 的废线路板元器件脱焊数值模拟 [J]. 环境工程学报, 2011, 5(2): 414-418.
- [13] 美国金属学会. 金属手册: 第二卷性能与选择 [M]. 9 版. 北京: 机械工业出版社, 1994: 795-807.
- [14] 陈帅帅. 电子垃圾处理过程中二噁英检测与减排研究 [D]. 常州: 江苏理工学院, 2018.
- [15] 曹白杨, 赵小青, 梁万雷. 回流焊温度曲线热容研究 [J]. 华北航天工业学院学报, 2005(3): 6-9.
- [16] 杨良军, 匡锐. 回流焊的工艺特点及研究 [J]. 科技广场, 2011(1): 191-193.