

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.03.007

印制电路板盲孔镀铜层热应力的仿真研究

周进群, 陈柳明*, 蒋忠明, 刘海龙, 王益文

(深南电路股份有限公司, 广东 深圳 518100)

摘要: 随着电子设备精巧化的提升, 采用电镀铜填充盲孔的高密度互连(High Density Interconnector, HDI)印制电路板得到广泛应用, 但与此同时盲孔带来的可靠性问题也日益凸显。针对电镀铜填充的三阶盲孔叠孔结构, 采用仿真手段, 探究了板材热膨胀系数、叠孔结构、焊盘宽度、板材厚度对盲孔镀铜层热应力分布的影响规律。结果表明盲孔与焊盘连接的拐角处存在着明显的应力集中现象, 板材热膨胀系数和叠构对孔铜热应力分布影响显著, 焊盘宽度影响不大, 板材厚度的增加会导致铜的热应力分布增大。

关键词: 高密度互连; 盲孔; 热应力; 数值模拟

中图分类号: TQ153.4 **文献标识码:** A

Simulation research on thermal stress of blind vias filled by copper plating in printed circuit boards

Zhou Jinqun, Chen Liuming*, Jiang Zhongming, Liu Hailong, Wang Yiwen
(Shennan Circuits Co., Ltd., Shenzhen 518100, China)

Abstract: With the improvement of the sophistication of electronic equipment, high density interconnector, (HDI) printed circuit boards with copper electroplated blind vias have been widely used, and the reliability failure caused by microvia is increasingly prominent. In this paper, the simulation is employed to investigate the thermal stress of three step blind via structure. The influence of different plate thermal expansion coefficients, stacked hole structures, pad widths, and plate thicknesses on the thermal stress distribution of hole copper. The results show that there is an obvious stress concentration phenomenon at the corner where the blind via and the pad connect. The thermal expansion coefficient and stacking structure of the board have a significant impact on the thermal stress distribution of the copper. The pad width has little effect. The increase of the board thickness increases the thermal stress of the copper. The distribution is increased.

Keywords: high density interconnector(HDI); blindvias; thermalstress; numericalsimulation

随着人们对电子设备多功能与精巧化的追求, 高密度互连(High Density Interconnector, HDI)印制

电路板应运而生, 相比于传统电路板采用的通孔结构, HDI产品采用了盲孔和叠孔结构, 如图1所示,

收稿日期: 2024-11-26

修回日期: 2024-12-28

作者简介: 周进群(1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电子电镀技术, email: chenlm2@scc.com.cn

通信作者: 陈柳明, email: fhff55588@163.com

引用信息: 周进群, 陈柳明, 蒋忠明, 等. 印制电路板盲孔镀铜层热应力的仿真研究[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(3): 47-52, 115.

Zhou Jinqun, Chen Liuming, Jiang Zhongming, et al. Simulation research on thermal stress of blind vias filled by copper plating in printed circuit boards[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(3): 47-52, 115.

使电路板内层拥有更多的布线孔间,提高了产品的集成密度,在消费类印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)产品中得到了广泛应用。HDI产品的生产过程往往要经过多次压合,其垂直方向的叠孔铜

结构也是经过多次层压与电镀连接起来,并非一个整体结构,不同层孔铜之间的结合力较弱,因孔铜开裂导致的失效问题频发,所以HDI产品的叠孔结构可靠性问题一直是困扰业内工程师的难题。

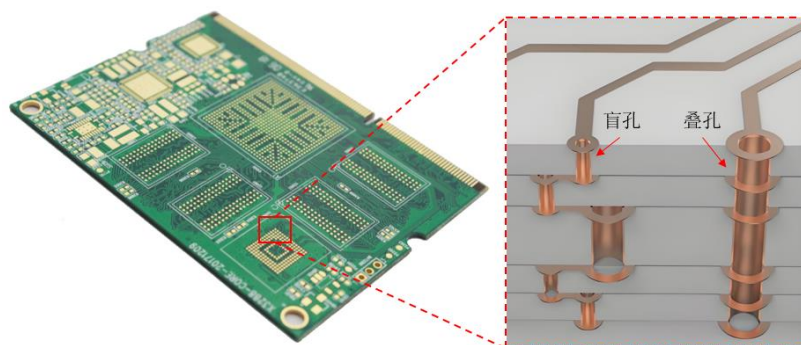


图1 HDI盲孔和叠孔结构

Fig.1 HDI blind vias and stacked vias structure

PCB主要由板材(树脂)与铜构成,然而板材与铜的热膨胀系数(Coefficient of thermal expansion, CTE)存在着很大的差异,铜的热膨胀系数为 $17 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$,且不随温度的变化而变化,板材常温下的热膨胀系数在 $5 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}$ 左右,但温度达到 $200 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时,可以升高到 $3 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$ 左右。在高温下铜与板材的膨胀变形相差较大,为了维持“变形协调”两种材料之间产生了较大的热应力,导致孔铜开裂与层间分离等可靠性问题,如图2所示。

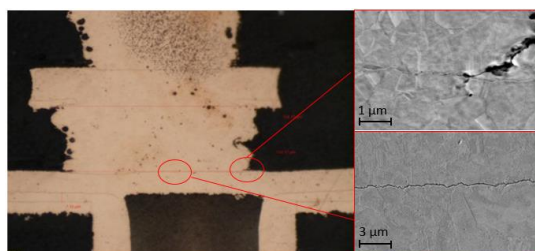


图2 盲孔失效

Fig.2 Failure of blind hole

为了解决由热应力导致的可靠性问题,国内外学者进行了相关研究,张浩敏等^[1]针对球形格栅阵列(Ball Grid Array, BGA)封装中产生的PCB焊盘坑裂,采用扫描电镜和热分析等方法得出PCB焊盘的坑裂主要是由焊盘的热膨胀系数不匹配所致;毛信龙^[2]针对PCB在表面贴装技术(Ball Grid Array, SMT)回流焊过程中的翘曲问题,使用Ansys软件对PCB在回流焊过程中的热应力进行了仿真,改善了温度曲线,调整了对PCB的约束,使PCB的变形最小化;纪丽娜等^[3]通过SEM-EDS和仿真手段针对印

制电路板镀盲孔失效问题开展了研究,得出镀液配比不当与硫等杂质元素过量时导致镀层开裂的关键因素,采用仿真手段确定了应力集中位置与实际观测位置一致;赵健^[4]采用仿真手段对PCB在回流焊过程中的热冲击进行了热-力分析,研究了PCB的温度场变化与热应力的分布,提出了减小翘曲的方法。梁东成等^[5]基于仿真手段研究了多器件组装PCB在温度冲击下不同元器件的服役状态,并使用Coffin-Masson公式预测了钎料的疲劳寿命。

Shen等^[6]根据多个设计参数对PCB通孔阵列进行热建模,通过计算流体动力学模拟和实验测量验证了所提出的热模型和设计优化算法;Zhou等^[7]通过高温和低温热冲击试验评估了PCB焊点的应力和应变分布,探究了不同温度条件下焊点的失效机理;Ji等^[8]使用宏观和微观测试方法和表征技术,对新型手机PCB上的孔进行了系统的失效分析,结果表明过孔位置不当与药水残留是导致盲孔在高温环境下临界热应力减小的原因。

综上所述,由热应力导致的PCB可靠性问题是相关技术工作者亟待解决的难题,基于之前的研究我们可以了解到热应力是造成孔铜开裂的直接原因,但之前的研究未对HDI叠孔结构的热应力进行深入的研究,影响HDI叠孔热应力的因素以及规律尚未明确。本文针对HDI电路板的三阶叠孔结构,针对膨胀系数、叠孔结构、焊盘宽度、板材厚度四大因素开展仿真研究,探究材料与结构对孔铜热应力分布的影响规律,为HDI产品的材料与结构选择提供指导,减小可靠性事故的发生概率,提高产品

可靠性。

1 温度场和材料变形相关机理

1.1 温度场概述

自然界中热量通过热传导、热对流、热辐射三种方式传递^[9], 热传导存在于物体内部或紧密接触的两种物质的传热过程中, 热对流描述流体与固体或流体之间的热量传递, 两种不接触的物体间的传热方式为热辐射。

1.1.1 热传导

热传导可以定义为完全接触的两个物体之间或一个物体的不同部分之间由于温度梯度而引起的内能的交换。热传导遵循付里叶定律, 如公式(1)所示:

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

式中: q 为热流密度, $W \cdot m^{-2}$; k 为导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$, “-”表示热量流向温度降低的方向。在PCB中, 热量主要通过热传导的方式进行传递。

1.1.2 热对流

热对流是指物体的表面与它周围接触的流体之间由于温差引起的热量交换。热对流可以分为两类: 自然对流和强制对流。热对流用牛顿方程(公式(2))来描述:

$$q = h(T_s - T_b) \quad (2)$$

式中: h 为对流换热系数(或称膜传热系数、给热系数、膜系数等); T_s 为固体表面的温度; T_b 为周围流体的温度。在回流焊过程中高温空气通过对流换热的方式传递给PCB。

1.1.3 热辐射

热辐射指物体发射电磁能, 并被其它物体吸收转变为热量的交换过程, 物体温度越高, 单位时间辐射的热量越多。热传导和热对流都需要有传热介质, 而热辐射无须任何介质, 在真空中的热辐射效率最高。在工程中通常考虑两个或两个以上物体之间的辐射, 系统中每个物体同时辐射并吸收热量, 它们之间的净热量传递可以用斯蒂芬-波尔兹曼方程(公式(3))来计算:

$$q = \varepsilon \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

式中: q 为热流率; ε 为辐射率(黑度); σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数, 约为 $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$; A_1 为辐射面1的面积; F_{12} 为由辐射面1到辐射面2的形状系数; T_1 为辐射面1的绝对温度; T_2 为辐射面2的绝对温度。在PCB的传热模型中, 热传递的传热量相比于前两

种方式的传热量可忽略不计。

1.2 材料变形概述

1.2.1 弹-塑性变形

材料产生了不可逆的形变, 往往要经过弹-塑性变形两个阶段, 以铜箔的拉伸曲线为例, 初始拉伸阶段材料的变形伸长量与拉力呈正相关的关系, 可以用胡可定律(公式(4))来描述:

$$F = kx \quad (4)$$

式中: F 为铜箔受到的拉力; k 为材料的弹性模量, 是随温度变化的函数; x 为材料因变形产生的位移。继续拉伸铜箔将进入屈服阶段, 此时拉力与位移呈现非线性关系, 是弹性变形与塑性变形的临界状态。随着拉力的继续增大铜箔进入塑性阶段, 此时铜箔强度较弱的地方会出现颈缩现象, 分子间有序排列遭到破坏, 产生了不可逆的变形, 拉力与变形位移呈现非线性状态, 继续拉伸材料的不可逆变形将继续增大, 直到产生裂纹并断裂, 金属材料的拉伸曲线如图3所示。

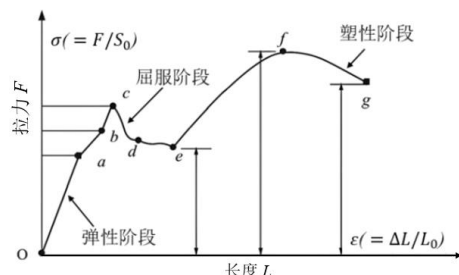


图3 金属拉伸曲线图

Fig.3 Metal tensile curve

1.2.2 热应力有限元方程

为了让计算机帮助我们进行数值计算, 就要构建可以描述实际过程的有限元方程, 首先热应力是由于材料的变形(公式(5))引起:

$$\sigma = D(\varepsilon - \varepsilon_0) \quad (5)$$

式中: σ 为热应力; D 为材料的刚度矩阵^[10]; ε_0 为温度变化引起的温度应变, 它现在是作为初应变出现在应力应变关系式中。对于三维问题(公式(6)):

$$\varepsilon_0 = \alpha(\varphi - \varphi_0) \quad (6)$$

式中: α 是材料的线膨胀系数; φ 是结构的现时温度场; φ_0 是结构的初始温度场。

根据能量守恒, 将上式代入虚位移原理表达式, 可得公式(7):

$$\int_v (\delta \varepsilon^T \sigma - \sigma u^T \bar{f}) - \int_{s\sigma} \delta u^T \bar{T} dS = 0 \quad (7)$$

式中: $\delta \varepsilon^T$ 是在 T 温度下产生的虚变形; δu^T 是在 T 温度下产生的虚位移; f 是形状因子; T 是温度; S 为

截面积。

根据以上方程,在确定温度与材料弹性模量后,即可求解热应力分布。

2 结果与分析

图4为初始条件下的孔铜三维模型,为了保证计算精度同时兼顾计算效率,选取了PCB板上的一处

三阶叠盲孔结构及其周围的板材为仿真对象,盲孔上/下孔径为 $125\text{ }\mu\text{m}/100\text{ }\mu\text{m}$,焊盘宽度为 $100\text{ }\mu\text{m}$,两层焊盘之间的板材厚度为 $80\text{ }\mu\text{m}$ 。板材与孔铜之间选用绑定条件进行联合,赋予交界面较大的结合力,不会产生相对滑移,孔铜与板材的材料参数如表1所示,表1中“CTE”为热膨胀系数(coefficient of thermal expansion, CTE)。

表 1 材料参数表

Tab.1 Material parameters

材料	密度 $/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	比热容 $/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	传热系数 $/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$	CTE/ $(\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1})$		弹性模量 $/\text{GPa}$	
Cu	8 920	390	400	17		33	
FR-4	1 870	1 200	0.35	玻璃态转变 温度前	玻璃态转变 温度后	低温	高温
				45	210	7.93	1.38

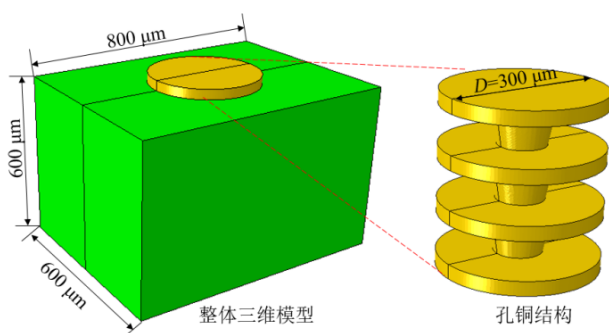


图 4 三阶盲孔叠孔结构

Fig.4 Three step blind vias stacking structure

三维模型的网格划分如图5所示,由于孔铜结构的形状复杂,所以整体采用四面体网格,在应力集中的位置对网格进行加密,保证计算精度,整体模型约12.5万个网格。

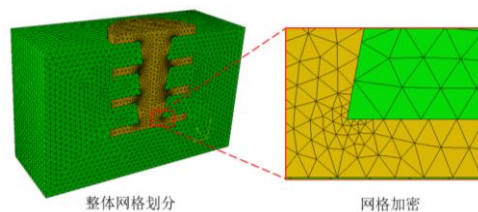


图 5 网格划分

Fig.5 Grid division

仿真模型的温度条件采用回流焊温度曲线,最高温度为 $260\text{ }^{\circ}\text{C}$,空气与孔铜表面进行对流换热,基于上述初始条件,分别对不同材料、焊盘环宽、叠构、介质厚度开展仿真研究,探究这些因素对孔铜结构热应力分布的影响规律,仿真变量如表2所示,表中 α_1 为玻璃态转变温度前的热膨系数; α_2 为为玻璃态转变温度后的热膨系数。

表 2 仿真实验条件

Tab.2 Simulation experiment conditions

变量名称		条件 1	条件 2	条件 3	条件 4
材料 CTE/ $(\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1})$	α_1	37	45	50	60
	α_2	175	210	240	360
焊盘宽度/ μm		50	75	100	125
板材厚度/ μm		60	80	100	120
盲孔叠构		直接叠孔	一阶错位	二阶错位	三阶错位

2.1 不同叠孔结构对热应力分布的影响

不同叠孔结构情况下,孔铜的热应力分布如图6所示,为了便于对热应力数据进行分析,对孔铜12

处热应力集中的区域进行了编号,如图6(a)所示并收集其热应力数据。由图可以看出应力集中区域主要位于盲孔与焊盘连接的拐角处,焊盘边缘与板材

接触的区域也出现了较大的应力, 不过该区域铜强度较高不易失效, 所以本文忽略该区域的研究分析。

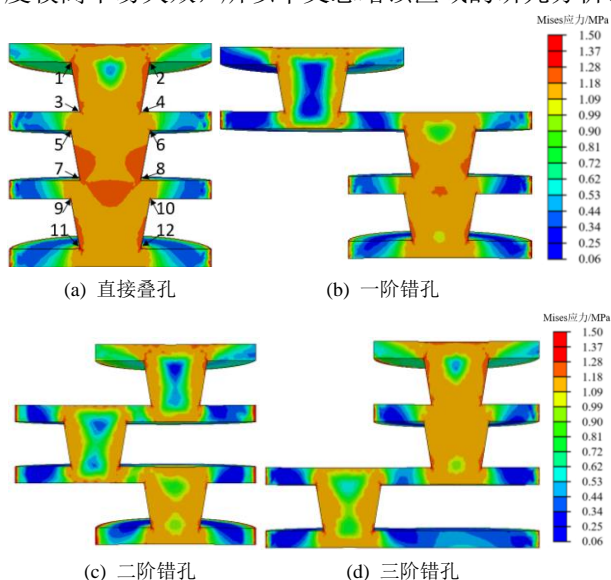


图 6 不同叠孔结构下热应力分布云图

Fig.6 Thermal stress distribution cloud diagram for different stacked vias

从图7可以看出, 除三阶叠孔外最大应力位置皆位于底层的拐角处, 根据仿真与以往的实验切片分析经验, 本文将大于130 MPa的应力区域划分为高风险区, 将低于120 MPa的应力区域划分为安全区。采用直接叠孔结构时最大应力出现在底层盲孔底部, 左右两点应力值大小分别为131.6和131.2 MPa, 是发生失效的高风险区域; 当叠孔方式为一阶、二阶错孔结构时盲孔热应力集中区域基本位于红线之下, 不易发生失效现象; 当采用三阶错孔结构时整体应力分布值较大, 最大应力位于第二层盲孔底部, 左右点应力值大小为131.2 MPa和132.0 MPa, 并且有个点在红线附近。综上可知, 一阶错孔结构整体应力水平分布较低, 为最优叠孔结构。

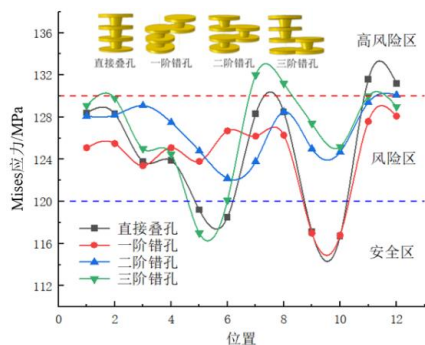


图 7 不同叠孔结构下热应力分布曲线

Fig.7 Thermal stress distribution curves for different stacked vias

2.2 不同材料对热应力分布的影响

取热膨胀系数不同的四款板材探究热膨胀系数对孔铜热应力的影响, 四款板材的热膨胀系数均为实测值, 且随着编号的增大而增大。从图8可以看出, 随着板材热膨胀系数的增大, 孔铜热应力云图的红色区域明显增多, 这表明应力较大区域增加, 孔铜发生失效概率增加。

由图9可知, 随着板材热膨胀系数的增大, 孔铜各个位置的热应力也随之增大, 当热膨胀系数 α_1 和 α_2 为 $60 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 和 $360 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 时, 孔铜由10个点的热应力均位于红线之上, 最大值达到了147.9 MPa, 具有较高的可靠性风险。由此得出板材热膨胀系数的增大会显著提高孔铜的热应力水平, 在实际加工中应尽量选择较小热膨胀系数的板材。

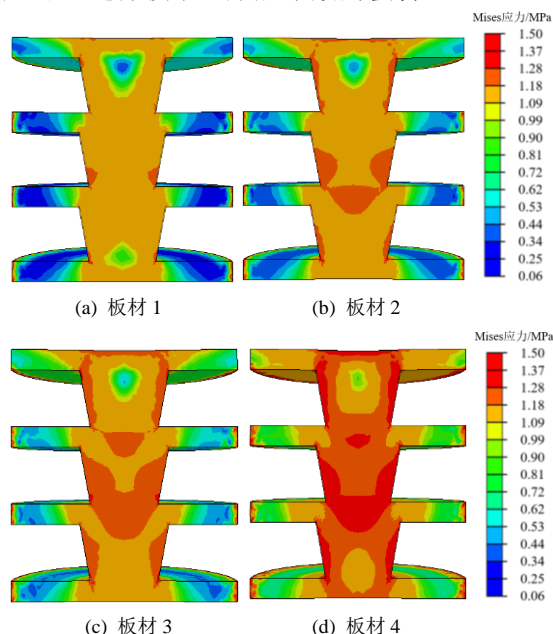


图 8 不同板材材料下热应力分布云图

Fig.8 Thermal stress distribution cloud diagram for different sheet materials

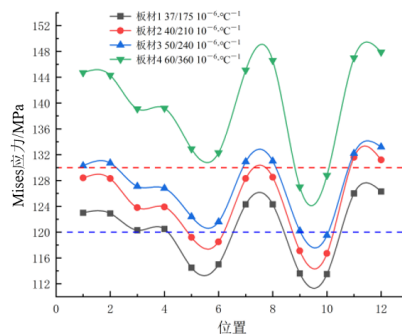


图 9 不同板材材料下热应力分布曲线

Fig.9 Thermal stress distribution curves for different sheet materials

2.3 不同焊盘宽度对热应力的影响

不同环宽条件下孔铜的热应力分布如图10和图11所示,随着环宽的增大,热应力随着焊盘宽度的增加呈现减小的趋势,最大热应力位于第12位置处,环宽值取125 μm 时,所有点的应力值均小于130 MPa,位于高风险区之下;环宽增大孔铜内部横截面上高应力区域面积减少,这也会较少失效问题的发生,相比于其它条件的影响,环宽对孔铜热应力分布的影响较小。由此可知,环宽的改变对孔铜的热应力分布影响较小,环宽值为125 μm 时,孔铜的失效概率最低。

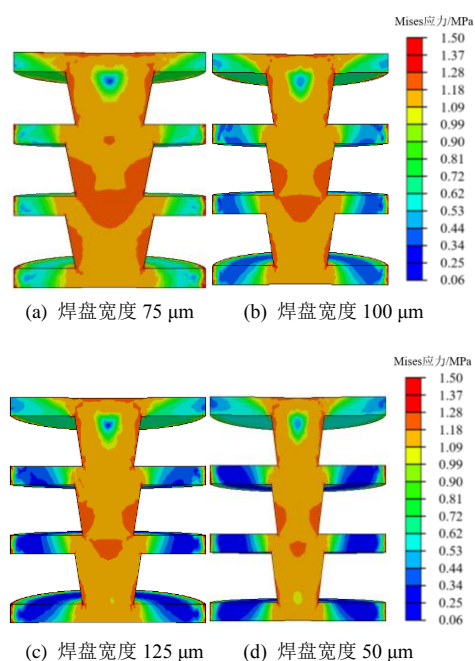


图 10 不同焊盘宽度下热应力分布云图

Fig.10 Thermal stress distribution cloud diagram for different pad widths

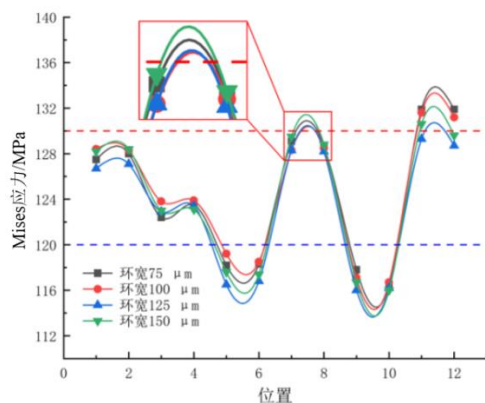


图 11 不同焊盘宽度下热应力分布曲线

Fig.11 Thermal stress distribution curves for different pad widths

2.4 不同板材厚度对热应力的影响

不同板材厚度下,孔铜的热应力分布如图12和图13所示,从图中可以看出随着板材厚度的增大,孔铜截面上大应力的面积增大,整体应力水平增大;受到板材厚度变化影响最大的区域第三层盲孔的上部,即9和10点,极差达到了8.9 MPa;12处应力集中处的应力值呈现出随着板材厚度增大而增大的趋势,当板材厚度为60 μm 时,盲孔的热应力分布取到最最小值,其它三个工况此处热应力相近。由此可知,为了减小孔铜的热应力分布应选用较薄的PCB结构设计。

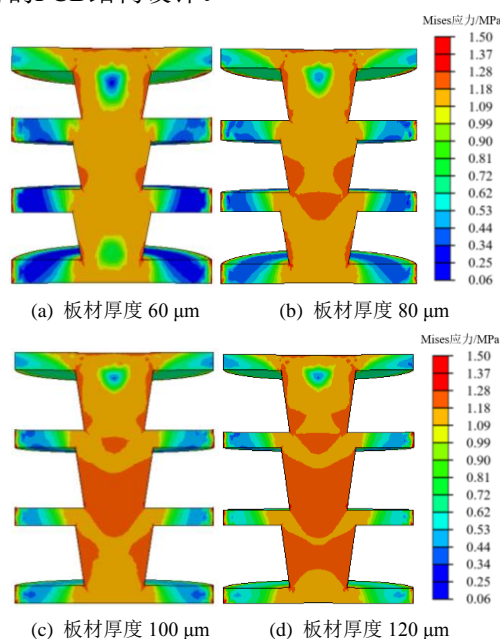


图 12 不同板材厚度下热应力分布云图

Fig.12 Thermal stress distribution cloud diagram for different plate thicknesses

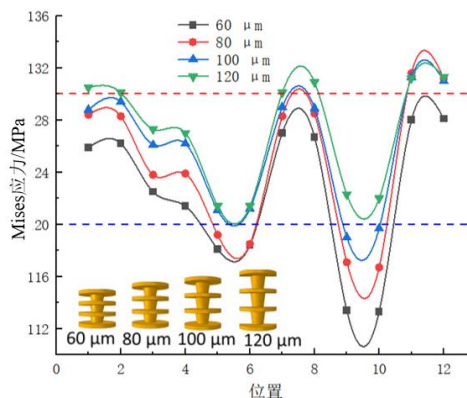


图 13 不同板材厚度下热应力分布云图

Fig.13 Thermal stress distribution cloud diagram for different plate thicknesses