

印刷线路板设计参数对镀通孔可靠性的影响

陈颖 霍玉杰 谢劲松 张源

(北京航空航天大学 工程系统工程系, 北京 100083)

(深圳华为技术有限公司 制造技术中心, 深圳 518129)

摘要: 基于镀通孔 (PTH, Plated Through Hole) 应力分布模型, 定量地研究了 PTH 线路板厚度与 PTH 直径之比 (高径比)、PTH 半径与镀层厚度之比、线路板有效作用半径与 PTH 半径之比等几何设计参数以及线路板玻璃化温度对 PTH 镀层应变及寿命的影响. 通过引入等效温度载荷, 给出了不同玻璃化温度下的应力分布模型. 研究表明, 在屈服温度载荷附近时, PTH 应变和寿命对几何尺寸非常敏感. 在固定线路板有效作用半径与 PTH 半径之比后, PTH 高径比影响较为明显. 对于一定厚度的线路板, PTH 半径越小, 镀层最大应变越大, 寿命越低. 在玻璃化温度以上, 应变急剧增加. 研究还表明应变集中系数并非固定不变, 而是在弹性和塑性范围内有所变化.

关键词: 镀通孔; 设计参数; 玻璃化温度; 寿命; 可靠性

中图分类号: TN 41

文献标识码: A **文章编号:** 1001-5965(2007)08-0954-05

Effects of PWB design factors on PTH reliability

Chen Ying Huo Yujie Xie Jingsong

(Dept. of System Engineering of Engineering Technology Beijing University of Aeronautics and Astronautics Beijing 100083 China)

Zhang Yuan

(Manufacture Technology Center Huawei Technologies Corporation Shenzhen 518129 China)

Abstract: Based on the barrel stress distribution model, the effect of printed wiring board (PWB) design factors such as plated through-hole (PTH) aspect ratio, the ratio of plating thickness over PTH radius, the ratio of board influence radius over PTH radius and glass transition temperature on PTH barrel stress and lifetime were studied quantitatively. Equivalent temperature load was introduced to found the barrel stress distribution model under different glass transition temperature. Results show that PTH life is sensitive to design factors when PWB operating at vicinities of the yielding temperature load. The PTH aspect ratio shows more significant impact when fixing the ratio of board influence radius over PTH radius. For the fixed PWB thickness, decrease PTH diameter results in the increase of PTH barrel stress and the decrease of PTH lifetime. PTH barrel strain sharply increases at the glass transition temperature. Results also show that the constant strain concentration coefficient is different in elastic and plastic stage.

Key words: plated through hole; design parameter; glass transition temperature; lifetime; reliability

对于通讯、电子、航空航天等涉及国计民生领域的电子产品, 印刷线路板 (PWB, Printed Wiring Board) 的失效会造成重大的经济损失. 镀通孔失效 (PTH, Plated Through Hole) 是 PWB 的主要失效方式, 但是目前工程中尤其是在批量生产的条件下仍然缺乏有效的手段对 PTH 失效进行前期

的发现, 因此通过设计环节提高 PTH 的可靠性成为一个重要的手段. 对于工程人员来说, 了解不同设计参数对 PTH 的影响及其重要程度, 可以帮助他们在设计时正确考虑这些因素, 加快设计流程并使产品达到高性能、高可靠性与低成本的要求. 除了几何设计参数之外, 玻璃化温度在 PWB 的组

收稿日期: 2006-10-20

基金项目: 国防科工委基础研究资助项目; 华为技术有限公司资助项目

作者简介: 陈颖 (1977-), 女, 河北丰润人, 博士后, chenying@april.buaa.edu.cn

装过程中对组装后板件可靠性的影响巨大,同样必须考虑.玻璃化温度的影响通常与设计参数的影响交织在一起,使得设计更加复杂.在质量与可靠性检验过程中,如果测试温度高于玻璃化温度,PTH 疲劳寿命将受到很大的影响,但可以减少样品的寿命循环,从而大大节约试验成本.因此玻璃化温度对测试结果的影响,必须在预测 PTH 寿命时进行充分考虑^[1].

目前工程实际中广泛应用电子电路互联和封装协会 (IPC, The Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits)模型来评估 PTH 的可靠性^[2].IPC 模型中假定 PTH 孔壁镀层中的热应力均匀分布,不考虑多个 PTH 之间的相互影响,因此利用 IPC 模型评估 PTH 的可靠性时,评估结果对线路板厚度、PTH 孔间距等不敏感,不能解释 PTH 在镀层中心应力应变最大的现象,预计结果同实验结果之间存在较大差异.而前期对 PTH 疲劳寿命影响因素进行研究的文献表明,除了材料参数外,尺寸参数(例如镀层厚度、PTH 直径、线路板厚度以及多个通孔的相互作用)对 PTH 的疲劳寿命均有很大影响^[3-6].利用有限元方法评估虽然针对性强,但对工程实际来说过于复杂,无法快速、直观地得到影响 PTH 寿命的各因素及其影响的程度.因此,利用目前的模型及方法,工程人员仍然无法直观量化地得到设计参数对 PTH 可靠性的影响.

文献[7]针对 IPC 模型存在的问题,通过考虑镀层中应力的分布及多个 PTH 之间的相互影响,提出了改进的解析模型(以下称应力分布模型),该模型已经用有限元与实验进行了验证,其适用性也经过了充分的研究.本文针对工程中 PWB 的设计和可靠性试验验证的实际需求,进一步使用了该应力分布模型,对 PTH 高径比、PTH 半径与镀层厚度之比、线路板有效作用半径与 PTH 半径之比等几何设计参数对 PTH 镀层应变及寿命的影响进行了较为详细而完整的分析,从而为 PWB 设计人员在设计及其优化的过程中提供了几何设计参数对 PTH 孔壁最大应变和疲劳寿命影响的直观的数量依据.此外,本研究中所提供的线路板玻璃化温度结果还为可靠性工程人员以及 PWB 的供应商进行加速实验设计和使用寿命评估提供了参考依据.

1 PWB 镀通孔应力分布模型

PWB 镀通孔应力分布模型所建立的 PTH 模

型示意图如图 1 所示,该模型对 PTH 做了如下假设:① PTH 是轴对称的;② PTH 镀层厚度均匀,不考虑电镀工艺缺陷;③ 不考虑焊盘及铜箔的影响;④ 镀层材料和线路板材料不发生蠕变;⑤ 材料的热膨胀理想化,即满足线性关系;⑥ PTH 镀层及线路板中各处温度相同.

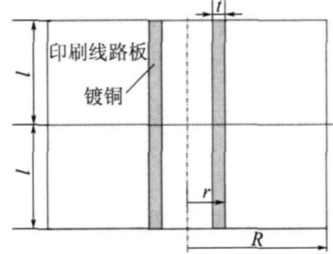


图 1 PTH 示意图

PTH 应力分布模型分别考虑了镀层弹性范围和塑性范围 2 种情况.应力分布模型给出的镀层应力应变分布的解析关系式如式(1)~式(8)^[2]所示.

$\sigma \leq S_Y$ 时

$$\sigma_z(z) = \left[1 - \left(\frac{z}{l} \right)^3 \right] \cdot \frac{4}{3\beta} (\alpha_E - \alpha_{Cu}) E_{Cu} \Delta T \quad (1)$$

$$\epsilon_z(z) = \sigma_z(z) / E_{Cu} \quad (2)$$

式中

$$\beta = \frac{4E_{Cu}}{G_E} \cdot \left[-\frac{f_1'(R/l)}{f_2'(R/l)} \right] \cdot \frac{r}{t} \cdot \frac{t}{l} + 1 \quad (3)$$

$\sigma > S_Y$ 时

$$\sigma_z(z) = \left[1 - \left(\frac{z}{z_Y} \right)^3 \right] \cdot \left[\frac{1 + (\beta - 1)z_Y/l}{\beta} \cdot (\alpha_E - \alpha_{Cu}) \Delta T - \frac{3}{4} \frac{S_Y}{E_{Cu}} \right] \cdot \frac{4}{3\beta} E'_{Cu} + S_Y \quad (4)$$

$$\epsilon_z(z) = \frac{S_Y}{E_{Cu}} + \frac{\sigma_z(z) - S_Y}{E'_{Cu}} \quad (5)$$

式中

$$\beta' = \frac{4E'_{Cu}}{G_E} \cdot \left[-\frac{f_1'(R/l)}{f_2'(R/l)} \right] \cdot \frac{r}{z_Y} \cdot \frac{t}{z_Y} + 1 \quad (6)$$

$$\left(\frac{z_Y}{l} \right)^3 = 1 - \frac{3\beta}{4} \cdot \frac{S_Y}{(\alpha_E - \alpha_{Cu}) E_{Cu} \Delta T} \quad (7)$$

$$-\frac{f_1'(R/l)}{f_2'(R/l)} = \left\{ \frac{5}{2} \left[\left(\frac{1}{4} - \frac{r}{l} \right) e^{\left(\frac{R}{r} \right)^{-2}} + \left[\frac{3}{4} \cdot \frac{r}{l} + \frac{1}{5} \right] \right] \right\}^{1/\beta} \quad (8)$$

式(1)~式(8)中, $\sigma(z)$ 为 PTH 镀层中的应力函数; S_Y 为 PTH 镀层材料的屈服强度; z 为沿 PTH 轴向的位置坐标; z_Y 为镀层弹塑变形临界点坐标; l 为线路板厚度的一半; t 为 PTH 的镀层厚度; R

为线路板有效作用半径; r 为 PTH 半径; α 为热膨胀系数; ΔT 为温度循环幅值(温度载荷); E 为弹性模量; G_E 为线路板的剪切模量; 下标 E 表示线路板相关的参数; 下标 Cu 表示 PTH 镀层相关的参数.

通过研究可以发现, 影响 PTH 镀层应力应变分布的 PWB 几何因素有 4 个: 线路板厚度 h (模型中的 $l=h/2$)、PTH 半径 r 、镀层厚度 t 和线路板有效作用半径 R . 其中 3 组比值是相互独立的, 即 l/h 、 R/h 和 l/h^2 .

2 几何尺寸对镀层最大应变的影响

对于实际的 PWB PTH 镀层厚度 t 和 PTH 半径 r 并不是相互独立的, t 一般为 r 的 $1/4 \sim 1/5$. 为了考虑 PWB 几何设计因素对 PTH 可靠性的影响, 本文将分别在 $r/t=5$ 和 $r/t=4$ 两种情况下, 研究 R/h 和 l/h 对 PTH 可靠性的影响. 同时还通过应力分布模型研究不同温度载荷下几何尺寸对 PTH 镀层最大应变的影响, 结果如图 2 所示. 分析中采用的材料参数如表 1^[8] 所示.

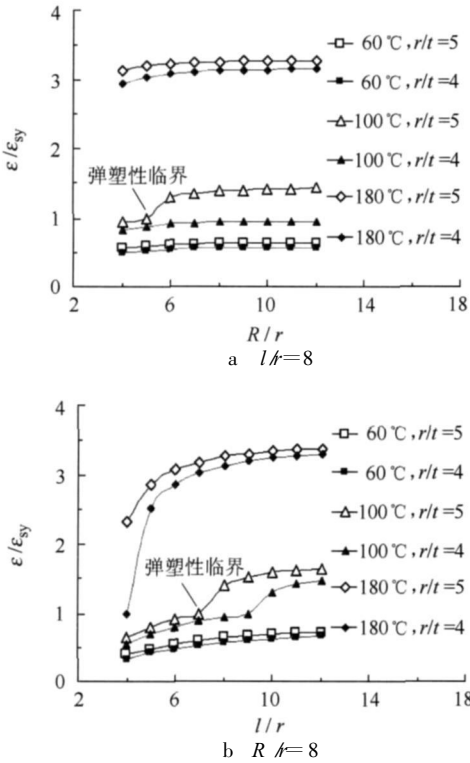


图 2 几何尺寸对 PTH 镀层最大应变的影响

图 2 中 ϵ 为 PTH 镀层最大应变, ϵ_{sy} 为 PTH 镀层应力达到屈服应力时的应变. 由图 2 可见 PTH 镀层最大应变整体上随 R/h 变大而变大, 但当 $R/h > 8$ 时变化不再明显, 此处线路板有效作用半径 R 与线路板上 PTH 的孔间距有关.

当线路板上有多个通孔时, 孔间距越小, 相应 PTH 的线路板有效作用半径越小, 在其它条件不变时, PTH 镀层的最大应变就越大. 但当孔间距大到一定程度时, 对 PTH 的影响即可忽略; l/h 对 PTH 镀层最大应变的影响比较明显, PTH 镀层最大应变随 l/h 增大而增大, 即对于一定厚度的线路板, PTH 半径越小, 镀层最大应变越大. 随着 l/h 的增大, 这种影响程度有减弱的趋势; 在 r/h 由 4 增加到 5 时, PTH 镀层最大应变变大, 即其它参数一定时, 镀层越薄其最大应变越大.

由图 2 还可以发现, 当镀层中心处于塑性范围, 尤其是处于弹塑性临界时, 镀层最大应变对几何尺寸比较敏感. 这是由于在应力分布模型中, 考虑了镀层沿 PTH 轴向的应力应变分布, 镀层中心应力应变最大, 随着温度载荷 ΔT 的增加, 其附近首先进入塑性, 而靠近两端的部分仍处于弹性, 材料在处于塑性状态时比弹性应变变化迅速, 这就使得镀层中心产生应力应变集中, 即镀层中心达到塑性后应变随 ΔT 变化较快. 而 IPC 模型中镀层各处应力应变相同, 不存在应力应变集中, 故镀层在弹性和塑性范围时随 ΔT 变化速率相当, 这一点可以从图 3 中 IPC 模型与应力分布模型中 PTH 镀层最大应变随 ΔT 变化的曲线得到.

考虑镀层在塑性范围内的应力应变集中是应力分布模型对 IPC 模型改进的一个重要方面. 在 IPC 模型中定义了“应变集中系数”来解决理论计算结果与实验结果的差异. 可以将应力分布模型计算的镀层最大应变与 IPC 计算的镀层应变之比看作“应变集中系数”, 如图 4 所示. 图 4 的曲线被分为弹性范围内的应变集中系数和塑性范围的应变集中系数. 由于应力分布模型所求得的应变在弹性阶段的应变小于 IPC 模型, 因此应变集中系数小于 1; 而在塑性阶段, 应变集中系数大于 1. 因此 IPC 模型中定义的恒定的“应变集中系数”不能对理论结果进行很好修正.

表 1 图 2 案例的材料常数

材料	热膨胀系数 $\alpha / 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$		弹性模量 E / MPa	塑性模量 E' / MPa	屈服强度 S_Y / kPa	泊松比 μ	玻璃化温度 T_g / $^\circ\text{C}$	断裂强度 S_u / kPa	延展率 D_f / %
	$T < T_g$	$T \geq T_g$							
PTH 镀铜	18		12	0.1	25	0.35		40	30
PWB	50	385	0.5			0.05	140		

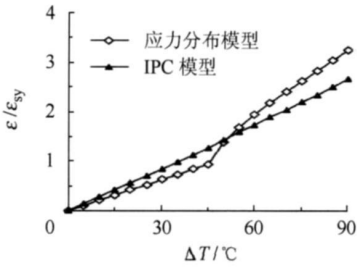


图 3 IPC 模型和应力分布模型的 PTH 镀层最大应变随温度载荷变化曲线 ($l/r=40$ $R/r=8$ $l/t=8$)

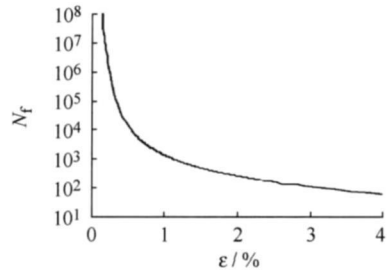


图 5 PTH 应变-寿命曲线

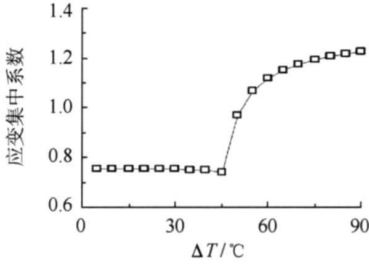


图 4 IPC 中应变集中系数随温度载荷的变化

图 2和图 3可见,对于镀层中心处于弹塑性临界时的 PTH 来说,其应变及寿命对温度载荷以及几何尺寸较敏感,这时调整 PWB 的测试或使用环境的温度及修改 PTH 几何尺寸要特别注意.此处引入屈服温度载荷的概念,定义为 PTH 镀层中心应力刚刚达到屈服强度时的温度载荷.

在弹性范围内,PTH 镀层最大应力应变与温度载荷 ΔT 呈线形关系, ΔT 为屈服温度载荷时所对应的最大应力就是屈服应力,故屈服温度载荷可以用式(9)简单地算出.

$$\Delta T_{cr} = S_Y \frac{\Delta T_e}{\sigma_e} \quad (9)$$

式中, ΔT_e 是屈服温度载荷; ΔT_e 是使镀层处于弹性的任意温度载荷; σ_e 是温度载荷为 ΔT_e 时,通过应力分布模型计算的镀层最大应力.工程人员在计算得到屈服温度载荷后,即可对该温度载荷附近几何参数对 PTH 应力应变的影响进行估计.

3 几何尺寸对 PTH 寿命的影响

寿命就是失效前的温度循环次数 N_f .根据文献 [8],疲劳寿命方程为

$$N_f^{-0.6} D_f^{0.75} + 0.9 \times \frac{S_u}{E_{Cu}} \left[\frac{D_f}{0.36} \right]^{0.1785} \ln \frac{10^5}{N_f} - \Delta \epsilon = 0 \quad (10)$$

式中, N_f 为预计的平均疲劳寿命(即失效前循环周期数); D_f 为 PTH 镀层材料断裂应变; S_u 为 PTH 镀层材料断裂强度; $\Delta \epsilon$ 为总应变.图 5 给出了根据式(10)得到的在表 1 材料属性下 PTH 的应变寿命曲线.图 5 可见,随着应变的增大,PTH 的寿

命减小,因此使 PTH 应变变大的几何尺寸,会使寿命变小.

图 6 所示是 PTH 几何尺寸对 PTH 寿命的影响,图中 N_{fy} 为 PTH 镀层中心处于弹塑性临界时 PTH 的寿命,由图可见 l/r 对 PTH 寿命的影响比 R/r 明显,从趋势上来看寿命随着 R/r 的增大而减小;镀层中心处于弹塑性临界时 PTH 寿命对几何尺寸的敏感性很大.这进一步确认了引入屈服温度载荷的必要.

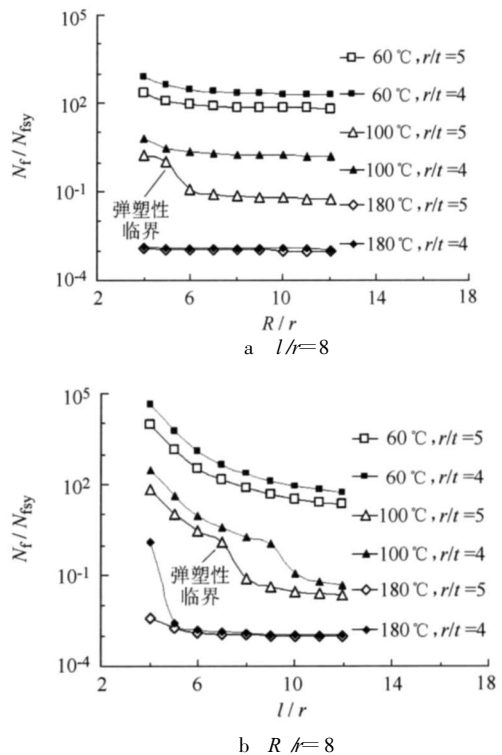
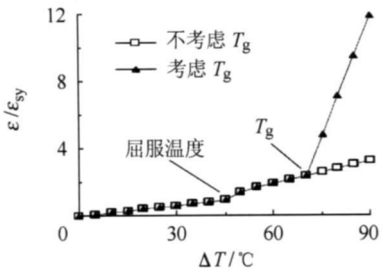


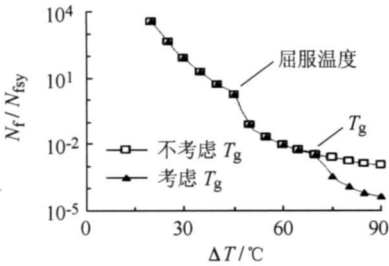
图 6 几何尺寸对 PTH 寿命的影响

4 玻璃化温度对 PTH 可靠性影响

玻璃化温度 T_g 是线路板的一个重要性能参数,随着温度的增加,印刷电路板达到 T_g 后,热膨胀系数会突然变大,使得 PTH 镀层应力应变急剧增加,从而影响 PTH 的可靠性.图 7 所示是在考虑线路板 T_g 与不考虑 T_g 两种情况下 PTH 镀层最大应变和寿命随温度载荷变化曲线.



a T_g 对最大应变的影响



b T_g 对寿命的影响

图 7 T_g 对 PTH 镀层最大应变和寿命的影响

($l/h=40$ $R/h=8$ $l/r=8$ $T_{min}=0^{\circ}C$)

图 7 可见, 在考虑了线路板 T_g 后, PTH 镀层在温度高于 T_g 后, 应变急剧增加, 寿命也随之减少. 随着温度的升高, 应变在屈服温度产生第 1 次变化, 随后在 T_g 产生第 2 次变化. 图 7 可见, T_g 的影响要比屈服温度影响更大. 因此在分析 PTH 的寿命时必须考虑 T_g 的影响.

由于应力分布模型只考虑了热膨胀系数恒定的情况, 本文引入等效温度载荷 ΔT_{eq} 的概念:

当 $T_{max} \geq T_g$ 时

$$\Delta T_{eq} = (T_g - T_{min}) + (T_{max} - T_g) \frac{\alpha_{E_{T_g}} - \alpha_{Cu}}{\alpha_E - \alpha_{Cu}} \quad (11)$$

当 $T_{max} < T_g$ 时

$$\Delta T_{eq} = T_{max} - T_{min} \quad (12)$$

式中 T_{max} 与 T_{min} 分别为温度循环中的最高温度与最低温度. 此处把线路板热膨胀系数 α 看成是温度的分段函数, 即在小于 T_g 时 $\alpha = \alpha_E$, 在大于 T_g 时 $\alpha = \alpha_{E_{T_g}}$. 式 (11) 将热膨胀系数的变化转化为温度载荷的变化. 利用式 (11)、式 (12) 计算出的等效温度载荷 ΔT_{eq} 代替式 (1) ~ 式 (8) 中的 ΔT , 就可以通过应力分布模型计算出考虑线路板 T_g 影响时镀层的应力应变, 再通过式 (10) 即可得到考虑 T_g 后的 PTH 寿命.

5 结 论

1) 温度载荷在屈服温度载荷附近时, PTH 寿命对几何尺寸非常敏感, 在本文所考虑的几何设

计参数中, 线路板厚度与 PTH 直径之比 (高径比) 影响较为明显;

2) 应变集中系数在塑性范围内大于 1, 而在弹性范围却有可能小于 1, 因此 IPC 模型中引入的应变集中系数可能存在不合理的因素;

3) 线路板玻璃化温度对 PTH 应变和寿命的影响很大, 在玻璃化温度以上, PTH 镀层应变急剧增加;

4) 通过将等效温度载荷引入应力分布模型, 可以在考虑玻璃化温度的情况下, 对 PTH 可靠性进行快速评估.

本文的研究已经应用到工程实际中, 为华为公司的印刷电路板优化设计提供了数量依据.

参考文献 (References)

- [1] Michael F. Donald B. Predicting plated through hole life and in the field from thermal stress data [C] // IPC Printed Circuits Expo APEX and the Designers Summit. Los Angeles: The Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits, 2006: 203-205.
- [2] Xie Jingsong, Kang Rui, Zhang Yuan, et al. A PTH reliability model considering barrel stress distributions and multiple PTHs in a PBW [C] // The 44th Annual IEEE International Reliability Physics Symposium. San Jose: IEEE Electron Device Society and IEEE Reliability Society, 2006: 256-265.
- [3] Mimin B. A. Mathematical model of a plated through hole under a load induced by thermal mismatch [J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, 1988, 11(4): 506-511.
- [4] Iannuzzi R. Predicting plated through hole reliability in high temperature manufacturing processes [C] // Proceedings of the 41st Electronic Components and Technology Conference. Atlanta: The IEEE Components, Packaging and Manufacturing Technology Society, 1994: 410-421.
- [5] Xie Jingsong, Huo Yujie, Zhang Yuan, et al. Effect of PWB design factors and glass transition temperature on PTH reliability [C] // The 39th International Symposium on Microelectronics. Washington DC: International Microelectronics and Packaging Society and The Microelectronics Foundation, 2006: 534-537.
- [6] Kobayashi T, Hayashida S. A study on reliability modeling for through hole cracking failure in thermal enhanced PBGA laminate [C] // Electronic Components and Technology Conference. Las Vegas: The IEEE Components, Packaging and Manufacturing Technology Society, 2000: 1658-1660.
- [7] 孙博, 张叔农, 谢劲松. PCB 镀通孔疲劳寿命对设计参数的灵敏度分析 [J]. 电子元件与材料, 2006, 25(9): 60-66. Sun Bo, Zhang Shunong, Xie Jingsong. Sensitivity analysis for the dependence of PTH fatigue life on PCB design parameters [J]. Electronics Components and Materials, 2006, 25(9): 60-66 (in Chinese).
- [8] Round R. Reliability evaluation of small diameter plated through holes in printed wiring boards [R]. IPC-TR-579, 1988.