

封装结构的热疲劳寿命预估研究进展*

贺思军 孙学伟

清华大学工程力学系, 北京 100084

提要 分别从理论计算、实验研究和失效机理的研究等几个方面综述了微电子封装结构(主要包括多层膜, 焊点及引线键合等结构)的热疲劳寿命预估研究领域的进展, 并对今后该领域的发展方向进行了预测。

关键词 高密度封装; 多层膜; 焊点; 热疲劳寿命; 应变幅

1 简介

高密度、高集成度、高功率已经日益成为今后封装发展的主要趋势。近几年来, 出现了一种新的封装技术叫作多芯片组件(MCM), 实际上就是混合集成电路和高密度封装的复合产物。预计在不久的将来, MCM将在微电子制造方面占主导地位^[1]。封装技术的发展诱发了许多技术问题。例如: 层与层之间的边界连接处必然产生应力集中, 从而急剧增加其应变水平; 层与层之间不同材料的热膨胀系数不同, 必然产生热失配问题; 复合微电子封装结构的生产过程及工艺十分复杂, 中间需经历多次加热及冷却的过程, 必然引起残余热应力或热落差应变, 加上层与层之间大量引入极易发生缺陷的材料界面, 使得微电子结构本身就具有大量的微观缺陷, 在承受封装工艺中反复的加热、冷却和使用过程中因工作、停止而造成的不断升温降温的作用后, 将导致热疲劳裂纹的产生、扩展, 最终导致失效^[2]。在对微电子产品可靠性要求日益增高的今天, 微电子产品的热疲劳寿命研究已经成为一个必要而且十分迫切的课题。

2 研究方法

图1描述了热疲劳寿命预估研究的常规途径, 即通过实验、数值计算, 或

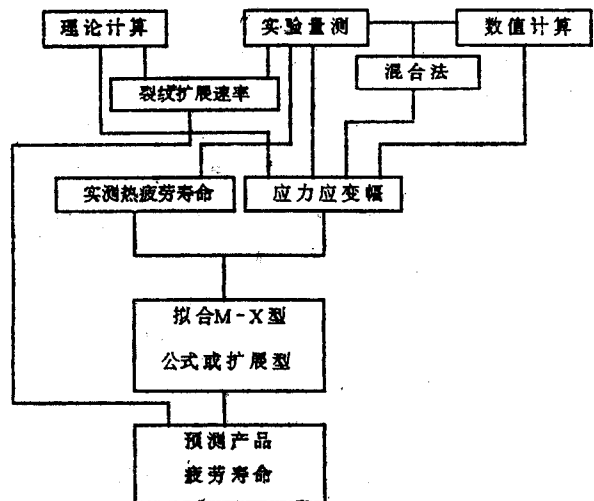


图1 热疲劳寿命预估方法

* 国家自然科学基金资助项目(编号 69391204)。

者理论简化计算得出应力应变幅,并通过实验测得热疲劳寿命的数据,然后通过数据处理拟合出 Manson-Coffin 类型或者扩展的 Manson-Coffin 经验公式;或者采用实验的手段得出裂纹扩展速率的经验公式,然后积分得出热疲劳寿命的预测公式(参见附表1)。

随着实验技术的不断发展,对微细观行为的研究也越来越深入。在对封装结构的热疲劳研究中也开始采用各种先进的实验技术和手段。例如:Yoshiki Oshida^[3]通过对疲劳试件作 X 射线衍射分析,得出试件位错密度 ρ 与应变幅 $\Delta\varepsilon$, 的经验关系式,为封装结构的剩余疲劳寿命的预估开辟了一条新的途径。

3 有限元计算和简化理论计算模型

微电子封装的结构十分复杂,是一种比较典型的多层膜结构,世界上最多的层数已经达到了一百多层。其应力应变通常必须采取简化的理论计算公式或者有限元方法求得。不少的文献报导了此类计算方法。

Morgan H S^[4] 提供了一个多层电子封装中热应力和热应变的算例。所计算的结构有三层:钴,焊料,钎,其中焊料作为线弹性材料和蠕变材料分别进行了计算,同时对采用二维单元和三维单元进行了对比,表明了采用有限元进行计算的可行性。

Sauber J^[5], Pao Yi-Hsin^[6] 分别引入考虑蠕变的本构方程,给出了采用 ABAOUS 大型有限元程序进行应力应变计算的结果。Sauber J 依此给出了表面安装焊点的热疲劳寿命预估公式。Pao Yi-Hsin 给出了铅锡焊点热疲劳断裂的寿命预估公式。

Yu Qiang^[7] 等介绍了一种特殊的有限元处理方法,在计算三维带导线式芯片载体的封装结构的热应力时,把焊点、导线分离出来,采用一种特殊的单元(称之为焊点元,是一种三维元)来处理。去除焊点和导线后剩余部分可以作平板结构处理,只需加上位移和温度场的连续条件,即可求解出应力,这样大大地减少工作量,而计算精度并未降低。

Lau J^[8], Verma S^[9], Bhanchdarker S M^[10] 等都采用了有限元的方法进行计算。

无疑,有限元的计算方法必将在微电子封装结构应力应变分析中得到广泛的应用。然而,由于薄膜结构的厚度太小,对有限元的计算必将十分不利,因此,有必要提出简化的理论计算模型。

Pao Yi-Hsin^[11] 等介绍了通过扩展 Suhir 的双金属模型,来计算多层膜的界面剪切应力及剥离应力的计算公式。Cifuentes A O^[12] 以一个五层结构为例,介绍了通过力平衡和力矩平衡的方程式和层间应变协调关系式,求解出层间作用力和作用力矩,然后计算出多层梁结构的热应力计算方法, Mirman B^[13] 也给出了多层梁结构层间应力计算的模型, Yin Wan-Lee^[14] 则讨论了斜边自由多层梁的热应力计算, Michal M^[15], Oizumi^[16], Peter A, Engel^[17] 等都建立了相应的计算模型并对封装结构的热应力进行了理论分析,可供薄膜应力计算时参考。

此外,蔡乾煌^[18] 给出了双材料板条的 Suhir 界面微分方程的一般解,可以解决板条的热失配问题,为多层膜热应力的简化计算提供了一个参考。

4 实验研究及重要结论

实验研究方面也取得了一定的进展。热疲劳的实验研究主要可以分为以下几种:应力应

变的测量,热疲劳寿命的测量,以及热疲劳过程中的微观行为的观察等。其中热应力应变的测量主要是用作疲劳分析的基础,而外界因素影响的测量及微观结构变化的观察主要是为失效的机理分析提供必要的信息。

4.1 实验技术

应力应变测量

目前,在封装结构中测量应力应变的方法主要有以下几种:直接测量法,即在待测部位贴上应变片进行测量(Dale J R^[19], Guess T R^[20]); X射线探测法(Dale J R^[19], Nguyen^[21]);云纹干涉法(Dale J R^[19], Guo Yi-Fan^[22])。

微观分析

许多先进的微观分析技术也逐渐在热疲劳研究中得以应用。扫描电子显微镜(SEM)已经被广泛采用。由于SEM技术的局限性,聚焦深度不够深,通常用于表面的微观分析。扫描声学显微镜(SAM)也已经为研究人员广泛采用(Su Gong-Yu^[23], Li Ming-Zheng^[24]),它利用声波在固体材料中传播时,受材料密度、组织结构、连续性等物理和化学性能影响的特点,通过声波的发射和接收,进行对比分析,反推出这些物理和化学信息。它不仅可以对多层膜的微观缺陷进行探测,而且可以深入观察到芯片内部。顾途等^[25]则采用横截面透射式电镜(CSTEM)对多层膜进行研究,该透镜对包含了许多界面的多层膜结构十分敏感,并可以直接观察表面和界面等微观结构的变化。

4.2 重要实验结论

焊点

由于封装结构中焊点的作用是不仅要用作电路的连接,还要起到机械的支撑作用。在工作环境下,焊点要经受多种复杂的应力应变,因此,焊点被认为是封装产品中最薄弱的环节,焊点的失效被当作最主要的失效原因之一。焊点的研究已广泛为科研人员所重视。

对焊点的热疲劳进行研究的文献较多,而且大多给出了热疲劳寿命的预估公式。文献[26—31]讨论了各种不同材料的焊点的热疲劳行为及寿命预估公式,表1列举了部分具体公式。

Zubelewicz A^[32]等综述了前期关于应变范围与失效形式关系的成果,认为当应变范围大于0.61%时,失效模式主要是晶间失效,而当塑性应变小于0.41%时,失效模式主要为晶内失效。因此,在全应变控制、拉-拉试验条件下,开展了对低锡高铅和铅锡易熔焊点的热疲劳寿命的研究,对存在循环硬化的低锡高铅焊料,建议了一种修正的Manson-Coffin公式,而对存在循环软化的铅锡易熔焊料,发现了材料的本构关系对实验结果的重要影响(具体公式见表1)

表 1 热疲劳寿命预估方法及公式

| 文献作者 | 结构类型 | 寿命公式 |
|-------------------------|-------------|---|
| Sauber J ^[6] | 微型阵列式封装 | $N_{50} = (\Delta\epsilon / 0.145)^{-1/0.28}$ |
| Guo Q ^[26] | 63Sn/37Pb焊点 | $\Delta\epsilon_p = 11.4 N_f^{-0.72}$ |

| | | |
|--------------------------------|---------------------|--|
| Ryohei ^[28] | Pb/63Sn 焊点 | $N_f = k \ln\left(\frac{ Aa_f + b }{ Aa_0 + b }\right) \cdot (\Delta\varepsilon_p)^{-n} \cdot f^m \exp(Q/kT_{max})$ |
| Zubelewicz A ^[32] | 96.5Sn/36.5Pb 焊点 | $N_f \Delta\varepsilon_{ov}^p ^n = \left(\frac{\Delta\sigma_{ov}}{\tau_0 n_{cr}} - 1\right) / k$ |
| Yoshiki Oshida ^[34] | Cu/Gr/Ka/Cr/Cu 薄膜结构 | $N_f = C \cdot f^m (\Delta\varepsilon_p)^{-n} \exp(Q/kT_{max})$ |
| Hu Jun-Ming ^[43] | 引线接合 | $N_f = C_i (h_i \Delta T)^{-m_i}$ |
| Pao Yi-Hsin ^[45] | Pb/Sn 焊点 | $N_f = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\gamma}{2\varepsilon_f}\right)^{1/c}$ |
| Pao Yi-Hsin ^[6] | Pb/Sn 焊点 | $\frac{da_{cr}}{dt} = \frac{\bar{\sigma}_e^n(0) (Bx_e)^{1/n+1}}{\varepsilon_f} \left(\frac{c^*}{I_n}\right)^{n/(n+1)} f(\Delta a/x_e)$ |
| Pao Yi-Hsin ^[27] | 97Sn/3Cu 焊点 | $\frac{d\gamma_e}{dt} = B^* \exp(-\Delta U/kT) \tau^n$ |

多层膜

相对来说,有关多层膜的研究虽然已经逐步展开,却未见有许多的文献报导,而且所作研究大多数停留在实验一拟合经验公式一解释现象的模式上,还没有比较全面的系统的关于多层膜热疲劳失效的理论。

Miura Hideo^[33] 等以塑料封装的多层硅片热应力测量的方法和实验结果,发现多层硅片间应力水平随温度循环次数增加而上升。Oshida Yoshiki^[34] 等则给出了多层膜结构的高周和低周疲劳损伤估计。以五层薄膜为例,在很宽的应变幅范围(0.25%—30%)内,得出了疲劳寿命 N_f 与应变幅 $\Delta\varepsilon_p$ 的经验关系式,并讨论了 Manson-Coffin 公式的可用性。Kuó Au-Yu^[35] 的实验结果和陈超^[36] 计算的结果表明了多层膜结构中,随着膜厚 h 在一定范围内的增加,界面间的剪切应力先是减少然后又增加的结论。

4.3 失效机理

关于失效机理的分析有以下两方面的进展,一是裂纹起源的原因,二是影响疲劳寿命的微观结构因素的研究。Lee Seong-Min & Donald S Stone^[37] 讨论了温度循环中表面安装焊点的微观结构变化。发现在循环热位移控制加载情况下,无导线的陶瓷基片和 J 形引线微型集成电路封装片分别承受 -36—125℃ 和 -20—75℃ 两个温度循环内的热载时,晶粒(片状或球状)出现相互滑移,裂纹主要起源于层间或基片下并迅速扩展到焊点突起的球状部分。Onuki Jin^[38] 等讨论采用铜作球焊时在热加载中出现的现象,认为其失效主要是由于裂纹沿球状焊点处根部的粗大晶界扩展而造成的,并得出其疲劳寿命随晶粒尺寸增大而缩短的结论。李云卿^[39] 探讨了微观组织变化与焊点热疲劳寿命的关系。Oizumi^[16] 认为层间分离主要起源于芯片的角上和边缘部分。Mei Z^[40] 从微观结构的变化入手,分析了在温度循环中,冷却速率增加时疲劳寿命有所增加这一现象。Thouless M D^[41] 分析了多层膜结构中铜膜和铝膜具有不同形状应力应变回线的原因,他认为这主要是因为各种不同的晶界扩散机制造成的。Tong Ho-Ming^[42] 等讨论了陶瓷封装中焊点表面有机聚合物附着层对其疲劳寿命的影响。以上结果表明微观结构对疲劳寿命的重要影响。

5 其它方面的研究

Hu Jun Ming^[43] 等针对不同的引线键合失效模式, 分别给出了相应的热疲劳寿命计算公式。为了综合考虑环境、几何形状等诸多不确定因素, 把 Basquin 公式 $N = CS^{-m}$ 加以扩展, 引进材料特性、封装几何、温度历史以及其他因素分别到相应的系数或表达式中去, 得到一个较为通用的热疲劳寿命预估公式 $N_i = C_i H_i^{-m_i} (\Delta T)^{-m_i}$ 。可以考虑把该方法应用到多层膜及焊点的热疲劳研究上去。

Danic I M^[44] 等把多层结构理解为类似复合材料的结构, 利用复合材料力学的分析方法进行计算, 来分析多层膜结构的热力学行为, 也不失为一条新的研究途径。

Pao Yi-Hsin^[45] 则采用断裂力学的方法对焊点的热疲劳寿命进行了预估, 认为焊点的热疲劳裂纹扩展主要是由 C^* 积分和 J 积分控制, 采用了考虑粘弹性、蠕变以及与时间无关的塑性本构方程, 裂纹的扩展采用了龙格-库塔法求解, 由此确定疲劳寿命, 结果与实验基本吻合, 证明了该方法的可靠性。给出了两算例, 并讨论了该方法的实用性。

6 发展趋势

随着科学技术的不断发展, 今后热疲劳问题的研究将朝着量化和精细化的方向发展, 到那时, 它可以全面考虑各种因素的影响, 从而准确地实现热疲劳寿命的预估。毫无疑问, 只有通过细观力学的研究, 才有可能达到这个目的。

细观力学的发展已经使固体力学步入了微电子元件这一领域, 杨卫^[46] 指出其主要的研究课题和应用对象为: 集成电路界面的剪切失效分析, 高应变膜层中的位错滑出, 多薄层超级硅片结构的破坏分析等等。著名的“牙膏”问题(延性芯线在基体热循环过程中挤出, 来触发薄膜层的层间开裂/屈曲泡)更是涉及复杂的细观力学分析。由此可见, 确实只有加强在微细观尺度上对热疲劳问题的研究, 才可能从根本上回答失效的机理问题, 达到准确地进行热疲劳寿命的预估。我们必须在精细的尺度上即在考虑材料的组织与细观缺陷的前提下, 来研究结构中裂纹扩展及其它失效形式的规律, 并用来指导结构及工艺设计, 实现最佳的材料性能。要研究物体的破坏过程, 就必须研究材料的损伤过程。损伤力学的目的就在于研究热循环加载过程中物体中的损伤及损伤随着变形而发展并且最终导致破坏的过程和规律。当今的热疲劳问题研究还缺乏强有力的理论指导。无疑, 通过细观的途径, 建立起材料的损伤本构关系和损伤演化方程, 写出连续介质损伤力学的控制方程和定解条件, 即得到一数学的边值问题, 求解该问题即可得到热疲劳寿命的理论预估值。无疑, 这是今后热疲劳问题研究的一条崭新的途径。

参 考 文 献

- 1 苏世民. 高密度、高性能 IC 封装的现状与发展趋势. 半导体情报, 30, 6 (1993): 51—57
- 2 余寿文. 薄膜-基底的几个力学问题研究. 力学与实践, 115, 4 (1993): 1—7
- 3 Yoshiki Oshida, P C Chen. High and low-cycle fatigue damage evaluation of multilayer thin film structure. *J. Elect. P.*, 113, 1 (1991): 53
- 4 Morgen H S. Thermal stresses in layered electrical assemblies bonded with solder. *J. Elect. P.*, 113, 4 (1991)
- 5 Sauber J, Seyyedi J. Predicting thermal fatigue for SMT solder joints. *J. Elect. P.*, 114, Dec.

- 6 Pao Yi-Hsin, Ratan Gocila, Scott Badgley, Edward Jih. An experimental and finite element study of thermal fatigue fracture of Pb Sn solder joints. *J. Elect. P.*, **115**, 1 (1993) : 1-8
- 7 Yu Qiang, Wang Shu-Bao. Thermal conduction and thermal stress analysis of surface mount assembly with a Solder Joint Element, Proceedings of the First ISMP (1994) : 194
- 8 Laur J, Subrahmanyam, Rice D, Erasmus S, Li C. Fatigue analysis of ceramic pin grid array soldered to an orthotropic epoxy substrate. *J. Elect. P.*, **113**, 2 (1991) : 138
- 9 Verma S, Dasgupta A, Barker D. A numerical study of fatigue life of J-Leaded soldered joints using the Energy Partitioning Approach. *J. Elect. P.*, **115**, Dec. (1993) : 416
- 10 Bhandarkar S M, Dasgupta A, Barker D, Pecht M, Engelmaier W. Influence of selected design variables on thermo-mechanical stress distribution in plated through-hole structures. *J. Elect. P.*, **114**, Mar. (1992) : 8
- 11 Pao Yi-Hsin, Ellen Eisele. Interfacial shear and peel stresses in multilayered thin stacks subjected to uniform thermal loading. *J. Elect. P.*, **113**, Jun. (1991) : 164-172
- 12 Cifuentes A O. A note on the determination of the thermal stresses in multi-metal beams subjected to temperature variations. *J. Elect. P.*, **113**, Dec. (1991) : 425-427
- 13 Mirman B. Interlaminar stress in layered beams. *J. Elect. P.*, **114**, Dec. (1992) : 389
- 14 Yin Wan-Lee. The effects of inclined free edges on the thermal stress in a layered beam. *J. Elect. P.*, **115**, Jun. (1993) : 209
- 15 Michael M. Stress analysis for large scale die plastic packages. NEPCON East Conference Joints. Boston (1991)
- 16 Oizumi, Imamura S, Tabata N. Stress analysis of Si-Chip and plastic encapsulate interface. Nitto Tech. Reports 51 (1987)
- 17 Peter A, Engel, Wu Kee Kong. Thermal stress analysis of pin grid array structures, pin and solder joint problems. *J. Elect. P.*, **114**, Sept. (1992) : 314
- 18 蔡乾煌. 双材料板条的界面用来求解两端面承受一般载荷的情况. 工程力学, **11**, 3 (1994) : 121
- 19 Dale J R, Oldfield R C. Mechanical stress likely to be encountered in the manufacture and use of plastically encapsulated devices. *Microelectronics and Reliability*, **16**, (1977) : 255
- 20 Guess T R, Burchett S N. An experimental analytical study of strains in encapsulated assemblies. *J. Elect. P.*, **115**, 3 (1993) : 298
- 21 Nguyen L T, Noyan I C. X-ray determination of encapsulation stresses on silicon wafers. *Polymer. Eng. Sci.*, **28** (1988) : 1013
- 22 Guo Yi-Fan, Charles G Woychik. Thermal strain measurements of solder joints in second level interconnections using moire interferometry. *J. Elect. P.*, **114** (1992) : 88
- 23 Su Gong-Yu, Chen Ge-Lin, Yue Guang-Qi, Hu Si-Zeng, Luo Su-Yun. Application of SAM to Electronic Device. Proceedings of the First ISMP (1994) : 191
- 24 Li Ming-Zheng and Sun Xue-Wei The experimental investigation of failure mode in three-layered specimen. Proceedings of the First ISMP (1994) : 200
- 25 顾途, 何杰, 钱家骏, 陈维德, 许振嘉. Co-Si 多层膜的透射电镜研究. 半导体学报, **14**, 12 (1993) : 738
- 26 Guo Q, Cutiongco E C, Keer L M, Fine M E. Thermomechanical fatigue life prediction of 63Sn/37Pb solder. *J. Elect. P.*, **114**, Jun. (1992) : 145-151
- 27 Pao Yi-Hsin, Badgley S, Jih E, Govila R. Constitutive behavior and low cycle thermal fatigue of 97Sn-3Cu solder joints. *J. Elect. P.*, **115**, Jun. (1993) : 147-152
- 28 Ryohei Satoh, Kiyoshi, Arakawa, Masahide Harada, Katsuhiro Matsui. Thermal fatigue life of PbSn alloy interconnections. *IEEE Transaction of CHMT*, **14**, Mar. (1991) : 224-232
- 29 Seyyedi J. Thermal fatigue of low-temperature solder alloys in insertion mount assembly. *J. Elect. P.*, **115**, Sept. (1993) : 305
- 30 Hacke P, Sprecher A F, Conrad H. Computer simulation of thermomechanical fatigue of solder joints inducing microstructure coarsening. *J. Elect. P.*, **115**, Jun. (1993) : 153
- 31 Lau J, Golwalker S, Eresmus S, Surratt R, Boysan P. Experimental and analytical studies of 28-pin thin small outline package (TSOP) solder joint reliability. *J. Elect. P.*, **114**, Jun. (1992) : 169
- 32 Zubelewicz A, Guo Q, Cutiongco E C, Fine M E, Keen L M. Micromechanical method to predict fatigue life of solder. *J. Elect. P.*, **112**, Jun. (1990) : 179-182
- 33 Hideo Miura. Thermal stress measurement in silicon chip encapsulated in IC plastic packages under temperature cycling. *J. Elect. P.*, **115**, Mar. (1993) : 9-15

- 34 Yoshiki Oshida, Chen P C. High and low-cycle fatigue damage evaluation of multilayer thin film structure. *J. Elect. P.*, **113**, Mar. (1991): 58—62
- 35 Kuo An-Yu, Chen Kuan-Luen. Effects of thickness on thermal stresses in a thin solder or adhesive layer. *J. Elect. P.*, **114**, Jun. (1992): 199
- 36 陈超, 清华大学学士论文 (1992)
- 37 Lee, Seong-Ming, Donald S Stone. Grain boundary sliding in surface mount solders during thermal cycling. *IEEE Transaction of CHMT*, **14**, 3 (1991) : 628—632
- 38 Onkui Jin. Investigation on enhancement of copper ball bonds during thermal cycle tests. *IEEE Transaction of CHMT*, **14**, 2 (1991) : 392
- 39 李云卿, 唐祥云, 马生, 刁凤琼. 62Sn-36Pb-2Ag 焊点组织及热疲劳裂纹的萌生与扩展. 清华大学学报, **33**, 5 (1993) : 49—55
- 40 Mei Z, Morri J W. Fatigue lives on 60Sn/40Pb solder joints made with different cooling rate. *J. Elect. P.*, **114**, Jun. (1992) : 104
- 41 Thouless M D, Gupta J, Harper J M E. Stress development and relaxation in copper films during thermal cycling. *J. Mater. Res.*, **8**, 8 (1993) : 1845—1852
- 42 Tong He-Ming, Effects of parylene coating on the thermal fatigue life of solder joints in ceramic packages. *IEEE Transaction of CHMT*, **15**, 1 (1993) : 571
- 43 Hu Jun Ming, Michael Pecht, Abhijit Dasguta, A Probabilistic approach for predicting thermal fatigue life of wire bonding in micro electronics. *J. Elect. P.*, **113**, (1991) : 275
- 44 Daniel I M, Wang T M. Thermomechanical behavior of multilayer structure in microelectronics. *J. Elect. P.*, **112** (1990)
- 45 Pao Yi-Hsin. A fracture mechanics approach to thermal fatigue life prediction of solder joints. *IEEE Transaction of CHMT*, **15**, 4 (1992) : 559—570
- 46 杨卫. 细观力学和细观损伤力学. 力学进展, **22**, 1 (1992) : 1

DEVELOPMENT OF THE RESEARCH ON THE THERMAL FATIGUE LIFE PREDICTION OF PACKAGING STRUCTURES

He Sijun Sun Xuwei

Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084

Abstract In this paper, an overview of the development of prediction study on the thermal fatigue life of electronic packages is presented, including theoretical and experimental aspects as well as failure mechanism analysis. A prophecy on the research trend in this area is suggested.

Keywords *high density, packages multilayered film structure, solder joints, thermal fatigue life, strain amplitude*