

低速冲击下裂纹成核的位错模型

黄再兴

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京, 210016)

摘要:从理论上研究低速冲击下金属材料中微裂纹的成核,建立了裂纹成核的位错模型,并在其中考虑温度与晶粒尺寸的影响;给出了在低速冲击载荷作用下脆性裂纹成核与延性裂纹成核的速度判据;定义了体现材料抗低速冲击能力的速度阻抗,确立了脆性裂纹成核与延性裂纹成核的速度阻抗的计算表达式;分析了在裂纹成核过程中的尺寸效应和脆性-延性转变。结果表明,裂纹成核的速度阻抗都随着晶粒的粗化而减小;脆性裂纹成核的速度阻抗随温度增加而增加,而延性裂纹成核的速度阻抗随温度增加而减小,两者的交点确定了脆性-延性转变温度。

关键词:微裂纹成核;低速冲击;速度阻抗;尺寸效应;韧脆转变

中图分类号:O346.5; TB301; V240.2

文献标识码:A

文章编号:1005-2615(2012)05-0657-06

Dislocation Model for Crack Nucleating in Metal Subjected to Low-Velocity Shocking

Huang Zaixing

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing
University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The microcrack nucleation due to the low-velocity shocking is investigated. A dislocation model for the microcrack nucleation is established. Based on the model, two velocity criteria are given to judge the brittle crack and the ductile crack nucleation respectively. In the two criteria, the shocking resistance is defined. The influences of the grain size and ductile-brittle transform temperature on the shocking resistance are determined. Results show that the resistance to the low-velocity shocking changes with the size of crystal graining in the direct proportion. The effects of temperature on the shocking resistances depend on the category of the microcrack nucleation. The shocking resistance of the brittle microcrack nucleation increases with temperature rising. On the contrary, the shocking resistance of the ductile microcrack nucleation decreases with temperature increasing. The ductile-brittle transform temperature is given in terms of the intersection between the shocking resistance-temperature curve of the brittle and ductile microcrack nucleation.

Key words: microcrack nucleating; low-velocity shocking; shocking resistance; size effect; ductile-brittle transform

随着航空工业的技术进步,以大规模集成电路为核心的电子系统在飞行器中的应用越来越广泛,所起的作用越来越重要。据报道^[1],20世纪50年代

飞机上的航空电子系统在飞机总成本中所占比例不足10%,但到现在,随着飞机功能的不断增强,飞机的航空电子系统的成本占飞机总成本的比例已

上升到30%~40%，航空电子系统业已成为决定飞机作战效能的重要因素。

通常，由热循环导致的焊点低周疲劳是影响电子器件可靠性的主要因素。但近期的研究表明，由低速冲击产生的过载，也能对电子器件的可靠性产生重要影响，这种情况在机械、航空、军备等领域中尤为常见。

较早研究焊点冲击可靠性的是 Wu, Song 等人^[2-3]，他们利用 LS-DYNA 软件模拟了电子器件的跌落冲击过程，研究了元器件在冲击载荷下的动态特性。Zhu 首先将子模拟技术应用到模拟球栅阵列 (Ball grid array, BGA) 结构器件跌落冲击，随后 Zhu 等人^[4-5]又将子模拟技术与隐/显函数求解法结合起来考察了芯片尺寸封装 (Chip size package, CSP) 器件的可靠性。

对低速冲击载荷作用下焊点的可靠性进行了较为深入研究的是 Tee 和 Ng 等人^[6-9]。他们先后对四侧引脚扁平封装 (Quad flat package, QFN)、方形扁平无引脚封装 (Quad flat no-lead package, QFP) 和 BGA 等不同封装形式的器件进行了抗冲击可靠性的研究，根据薄型球栅阵列结构 (Thin fine-pitch ball grid array, TFBGA) 跌落冲击模型和大量的分组对比实验，定量分析了受低速冲击焊点的失效情况，首创性地给出了基板级跌落冲击寿命预测的公式，其结果与实验数据吻合良好。

英特尔公司的 Pitarresi 等人^[10]分别研究了电脑组装基板在低速冲击下的响应特性。日本富士通公司也进行了类似的研究。最近，Noh 等^[11]研究了在不同温度与湿度条件下底部填充对基板级封装抗跌落强度的影响。Kwak 等人^[12]采用产品级自由跌落实验方式测试了无铅焊点在冲击载荷作用下的动态力学特性。

低速冲击既影响焊点中微裂纹的成核，也可导致既有裂纹的扩展。后一问题已有大量的文献报道，并有比较成熟的模型；但对前一问题的研究相对较少，即使是对于一般的金属材料。冲击速度与焊点微裂纹成核的关系十分重要，但从实验上对这一问题进行研究十分困难，目前鲜有结果。基于这种背景，本文的目的即在于建立一个低速冲击下裂纹成核的位错模型，给出裂纹成核的判定准则，以期能够了解焊点受低速冲击时的失效机理，为电子器件的可靠性分析提供物理基础。

1 基本方程

金属材料中的裂纹成核 (亦称裂纹萌生) 主要决定于位错运动。目前，解释裂纹萌生的理论主要有^[13-14]：Stroh 位错塞积模型，Cottrell 位错反应模型，Smith 第二相粒子模型以及空穴偶极子模型。前三者适用于脆性、半脆性固体，后者用于延性固体。但这些模型几乎没有考虑温度变化时的位错热激活效应，也很少考虑动态载荷的影响等。

按照目前比较一致的看法^[13-14]，裂纹成核与位错塞积过程密切相关。从这一观点出发，并考虑位错的热激活以及动态载荷的影响，假设：

- (1) 位错塞积的累积效应是裂纹成核的动因；
- (2) 当位错塞积处的位错能超过内聚能时裂纹成核；
- (3) 塞积区内的位错均为彼此平行的直线刃型位错，其分布连续；
- (4) 只考虑低速冲击载荷的动态效应；
- (5) 塞积区内的温度均匀分布。

如图 1 所示，在一个表示体元内的晶界处出现位错塞积。为方便，取绝对零度为参考温度，此时设 $\rho(x)$ 表示沿 x 轴的位错分布密度，由位错的平衡条件可得^[14]

$$\rho(x) = \frac{2(1-\nu)\sigma}{\mu b} \frac{x}{\sqrt{c^2-x^2}}$$

(1)

式中： b 为 Burgers 矢量； μ 与 ν 分别为剪切模量、Poisson 比； c 为位错双塞积区的半长。

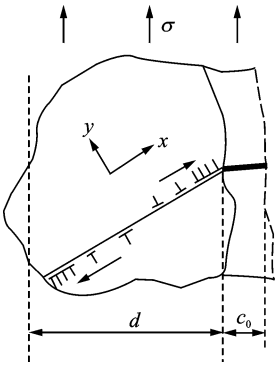


图 1 位错塞积模型

随着温度上升，塞积区的位错密度 $\rho(x)$ 会因为位错的热激活而变化，因此， $\rho(x)$ 是温度相关的。对于刃型直线位错，无论是滑移还是攀移，它们的速度一般都可表示为^[13-14]

$$v_n \propto \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right)$$

两者只是活化能因子 Q 的取值有所区别。因此,温度为 T 时的位错密度 $\rho(x,T)$ 可以写成

$$\rho(x,T) = \rho(x) \left[1 \pm a_s \exp \left(- \frac{Q_s}{kT} \right) \pm a_c \exp \left(- \frac{Q_c}{kT} \right) \right] \quad (2)$$

式中: Q_s 与 Q_c 分别对应滑移与攀移的活化能因子; k 为 Boltzmann 常数; a_s 与 a_c 是两个材料常数。式(2)中的正、负号取决于位错是进入还是离开塞积区,这依赖于断裂的类型。令

$$g(T) = 1 \pm a_s \exp \left(- \frac{Q_s}{kT} \right) \pm a_c \exp \left(- \frac{Q_c}{kT} \right) \quad (3)$$

则式(2)简写为

$$\rho(x,T) = \rho(x)g(T) \quad (4)$$

单根刃型位错所具有的总能量(位错自能)一般可表示为^[14]

$$w_s = \frac{\mu b^2}{4\pi(1-\nu)} \ln \frac{R}{\lambda b} \quad (5)$$

式中: R 为位错半宽; λ 为材料参数,其值可近似取为1/4。塞积区内位错总自能 W_s 为所有位错自能之和,故

$$W_s = \int_{-c}^c w_s \rho(x,T) dx \quad (6)$$

将式(1)代入式(2)后,再将式(2,5)代入式(6),得

$$W_s = \frac{\sigma b}{2\pi} \ln \left(\frac{R}{\lambda b} \right) g(T) \int_{-c}^c \frac{x}{\sqrt{c^2 - x^2}} dx = 0 \quad (7)$$

因此,双塞积区内位错总自能恒为零。

如图2所示,设两根平行刃型直位错的 Burgers 矢量分别为 b_1 与 b_2 ,它们之间的间距为 d 。设 x 轴与 Burgers 矢量的正方向一致, x 轴与两位错连线的夹角为 θ 。则根据Blin 公式^[14]可导出这两根位错之间的交互能(位错互能)

$$w_{12} = - \frac{\mu b_1 b_2}{4\pi(1-\nu)} \ln \frac{d}{d_0} - \frac{\mu b_1 b_2}{4\pi(1-\nu)} \sin^2 \theta \quad (8)$$

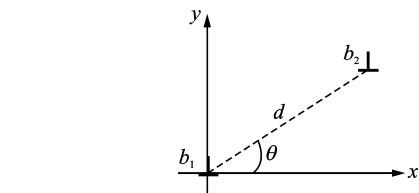


图2 平行刃型直位错的相互作用

因此,根据式(1,2,8),塞积区内位错总互能 W_m 可表示为

$$W_m = - \frac{(1-\nu)\sigma^2}{\pi\mu} g(T)$$

$$\int_{-c}^c \int_{-c}^c \frac{xy(\ln|x-y| - \ln d_0 + \sin \theta)}{\sqrt{c^2 - x^2} \sqrt{c^2 - y^2}} dx dy = \frac{\pi(1-\nu)\sigma^2 c^2}{2\mu} g(T) \quad (9)$$

从式(9)容易看出, W_m 与 d_0, θ 无关。塞积区内总位错能 W_d 为自能 W_s 与互能 W_m 之和。因此, W_d 可表示为

$$W_d = W_s + W_m = \frac{\pi(1-\nu)\sigma^2 c^2}{2\mu} g(T) \quad (10)$$

用有效应力 σ_e 代替 σ ,即可将式(10)推广到三维情况。这里

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma_{ij} \sigma_{ij}} \quad (11)$$

根据假设(2),当 W_d 超过内聚能时裂纹成核,由裂纹成核的能量平衡关系,可得

$$\Delta W_d = 2\gamma \Delta A \quad (12)$$

式中: A 为成核裂纹的表面积; γ 为比表面能。不失一般性,设成核裂纹的宽度为单位1,长度为 a ,则 $\Delta A = \gamma \Delta a$ 。这样式(12)可写微分方程

$$\frac{dW_d}{da} = 2\gamma \quad (13)$$

由于模型中假设位错塞积区即为裂纹成核区,微裂纹的出现就意味着塞积区尺寸的扩展。为简单,笔者直接假设 $dc/da = 1$ 。注意到这一关系,并设 σ 保持不变,则将式(10)代入式(13),得

$$\sigma = \sqrt{\frac{2\mu\gamma}{\pi c(1-\nu)g(T)}} \quad (14)$$

2 冲击载荷下脆性断裂裂纹成核判定准则

脆性断裂的位错双塞积模型如图3所示,此时因热激活产生的位错会通过攀移进入塞积区,而部分位错又会因滑移从侧面离开塞积区。然而,由于攀移速度远小于滑移速度^[13-14],因此式(2)可简化为

$$g_b(T) = 1 - a_s \exp \left(- \frac{Q_s}{kT} \right) \quad (15)$$

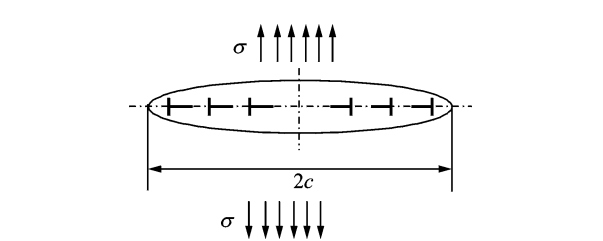


图3 脆性断裂位错双塞积模型

为便于区别,在式(15)中笔者用 $g_b(T)$ 代替了 $g(T)$,考虑低速冲击载荷下脆性裂纹成核。由于塞积区内的位错为不动位错,假定低速冲击对裂纹成核的影响主要体现在载荷的性质上。对于脆性裂纹成核,只有张拉载荷才会产生影响,因此,在低速冲击下,式(14)中的 σ 可以表示为^[15]

$$\sigma = \rho_m c_l v_b \tag{16}$$

式中: ρ_m 为质量密度; c_l 为纵波波速, $c_l = \sqrt{\frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho_m}}$; v_b 为脆性裂纹成核的临界冲击速度。注意到弹性模量 E 与剪切模量 μ 、Possion 比 ν 的关系,然后将式(16)代入式(14),得

$$v_b = \sqrt{\frac{(1-2\nu)\gamma}{(1-\nu)^2\pi\rho_m c g_b(T)}} \tag{17}$$

式(17)右端体现了材料的抗低速冲击的属性,称之为速度阻抗。因此,低速冲击载荷下脆性裂纹成核的判定准则可表示为

$$v \geq \sqrt{\frac{(1-2\nu)\gamma}{(1-\nu)^2\pi\rho_m c g_b(T)}} \tag{18}$$

式中 v 为载荷冲击速度。它表明:对于低速冲击,只有当载荷速度超过了速度阻抗,才会出现脆性裂纹成核。

3 冲击载荷下延性断裂裂纹成核判定准则

延性断裂的位错双塞积模型如图 4 所示,此时因热激活产生的位错会通过滑移进入塞积区,而部分位错又会因攀移从侧面离开塞积区。然而由于攀移速度远小于滑移速度^[13-14],因此式(2)可简化为

$$g_d(T) = 1 + a_s \exp\left(-\frac{Q_s}{kT}\right) \tag{19}$$

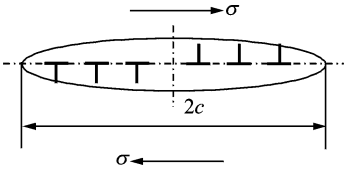


图 4 延性断裂位错双塞积模型

考虑低速冲击载荷下延性裂纹成核。由于只有剪切载荷才会对延性裂纹成核产生影响,因此,在低速冲击下,式(14)中的 σ 可以表示为^[3]

$$\sigma = \rho_m c_t v_d \tag{20}$$

式中: c_t 为横波波速, $c_t = \sqrt{\frac{\mu}{\rho_m}}$; v_d 为延性裂纹成核的临界冲击速度。将式(20)代入式(14),得

$$v_d = \sqrt{\frac{2\gamma}{(1-\nu)\pi\rho_m c g_d(T)}} \tag{21}$$

式(21)右端即为速度阻抗。显然,延性裂纹成核的速度阻抗不同于脆性裂纹成核的速度阻抗。根据式(21),低速冲击载荷下延性裂纹成核的判定准则可表示为

$$v \geq \sqrt{\frac{2\gamma}{(1-\nu)\pi\rho_m c g_d(T)}} \tag{22}$$

4 晶粒尺寸与温度对裂纹成核速度阻抗的影响

位错塞积区的大小和晶粒尺寸相当^[1-2],因此可以将 c 看成是晶粒尺寸。为了便于分析晶粒尺寸与温度对裂纹成核速度阻抗的影响,定义下面的量纲一量

$$\underline{v}_b = v_b \sqrt{\frac{(1-\nu)\pi\rho_m b}{2\gamma}}$$

$$\underline{v}_d = v_d \sqrt{\frac{(1-\nu)\pi\rho_m b}{2\gamma}}$$

$$\underline{c} = \frac{c}{b}$$

$$\underline{T} = \frac{kT}{Q_s}$$

利用这些量纲一量,式(17,21)可改写为

$$\underline{v}_b = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)\underline{c}g_b(\underline{T})}}$$

$$\underline{v}_d = \sqrt{\frac{1}{\underline{c}g_d(\underline{T})}} \tag{23}$$

取 $\nu=0.3, a_s=1.0$ 。图 5 给出了 $\underline{T}=0.1, 1.0$ 和 10.0 时的 \underline{v}_b - \underline{c} 与 \underline{v}_d - \underline{c} 曲线。可以看出,尽管温度不同,但无论是脆性断裂还是延性断裂,裂纹成核的速度阻抗都随着晶粒的粗化而减小。这与 Hall-Petch^[13-14]定律所描述的屈服应力与晶粒尺寸的关系

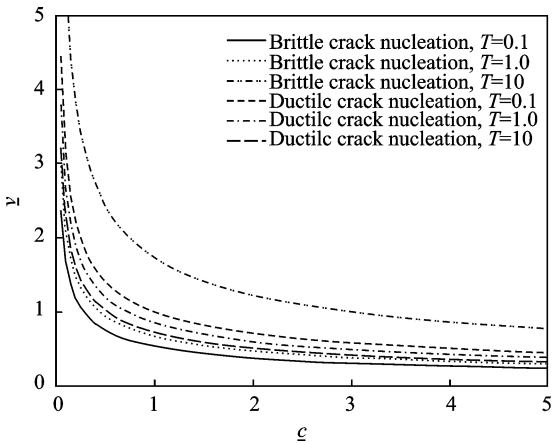


图 5 晶粒尺寸对裂纹成核速度阻抗的影响

系很相似。它意味着在实际应用中可以通过退火等工艺措施细化材料的晶粒度来提高裂纹成核的速度阻抗。

图 6 给出了 $c=0.1, 1.0$ 和 10.0 时的 \underline{v}_b-T 与 \underline{v}_d-T 曲线。从中可以看出,当晶粒尺寸一定时,脆性裂纹成核的速度阻抗随温度增加而增加,这意味着低温时更容易出现脆性裂纹成核,而高温则对脆性裂纹成核具有抑制作用。与之相反,延性裂纹成核的速度阻抗随温度增加而减小。因此在低速冲击载荷作用下,温度越低,材料越容易发生脆断;而温度越高,则更趋向于延性断裂。这个结论与目前的实验与观察结果是一致的。

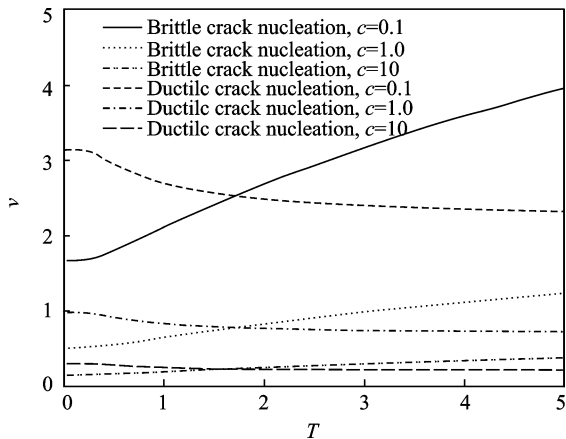


图 6 温度对裂纹成核速度阻抗的影响

从图 6 中可以看到一个有趣的现象,当晶粒尺寸相同时, \underline{v}_b-T 与 \underline{v}_d-T 曲线有一个交点。设该交点对应的温度为 T_0 ,则当 $T < T_0$ 时,脆性裂纹成核的速度阻抗小于延性裂纹成核的速度阻抗;而当 $T > T_0$ 时则反之。因此,笔者认为 T_0 是材料的脆性-延性转变温度。在 T_0 之下,材料更多体现为脆性,易发生脆断;而在 T_0 之上,材料更多体现为延性,在外载作用下趋向于延性断裂。

5 结 论

本文基于位错理论,建立了裂纹成核的能量模型,并在其中考虑了温度与晶粒尺寸的影响;给出了在低速冲击载荷作用下脆性裂纹成核与延性裂纹成核的速度判据;定义了体现材料抗低速冲击能力的速度阻抗,确立了脆性裂纹成核与延性裂纹成核的速度阻抗的计算表达式;发现了在裂纹成核过程中脆性-延性转变温度的影响。通过计算、分析,得到如下结论:

(1) 无论是脆性断裂还是延性断裂,裂纹成核

的速度阻抗都随着晶粒的粗化而减小;反之,晶粒越细,裂纹成核的速度阻抗越高。

(2) 晶粒尺寸一定时,脆性裂纹成核的速度阻抗随温度增加而增加,而延性裂纹成核的速度阻抗随温度增加而减小。

(3) 在脆性-延性转变温度之下,材料更多体现为脆性,易发生脆断;而在脆性-延性转变温度之上,材料更多体现为延性,在外载作用下趋向于延性断裂。

这些结果对低速冲击载荷作用下电子焊点的可靠性评估具有参考价值,然而需要指出,尽管文中的模型可以预测一些熟知的事实,如 Hall-Petch 关系与脆性-延性转变温度,但由于目前很难对裂纹成核作定量观测。因此,文中模型尚需进一步的实验验证。

参考文献:

[1] 霍曼,邓中卫. 国外军用飞机航空电子系统发展趋势[J]. 航空电子技术, 2004, 35(4): 5-10.
Huo Man, Deng Zhongwei. Development trend of foreign military avionics[J]. Avionics Technology 2004, 25(4): 5-10.

[2] Wu J, Song G, Yeh C, et al. Drop impact simulation and test validation of telecommunication products [C]//Proceedings of IEEE Inter Society Conference on Thermal Phenomena. Seattle WA: IEEE, 1998: 330-336.

[3] Wu J. Global and local coupling analysis for small components in drop simulation [C]//6th International LS-DYNA users conference. Michigan: [s. n.], 2000: 1117-1126.

[4] Zhu L. Submodeling technique for BGA reliability analysis of CSP packaging subjected to an impact loading [C]// International Electronic Packaging Technical Conference. Hawaii: [s. n.], 2001: 1401-1409.

[5] Zhu L, Marcinkiewicz W. Drop impact reliability analysis of CSP packages at board and product system levels through modeling approaches [C]//9th ITHERM. Las Vegas: [s. n.], 2004: 296-303.

[6] Tee T Y, Ng H S, Yap D, et al. Board level solder joint reliability modeling of telecommunication applications [J]. Microelectronics Reliability, 2003, 43 (7): 1117-1123.

[7] Tee T Y, Luan J E, Pek E, et al. Novel numerical and experimental analysis of dynamic responses un-

der board level drop test [C]//Europe SIME Conference. Belgium: [s. n.], 2004: 133-140.

[8] Tee T Y, Ng H S, Lim C T, et al. Impact life prediction modeling of TFBGA packages under board level drop test [J]. Microelectronics Reliability, 2004, 44(7): 1131-1142.

[9] Tee T Y, Ng H S, Lim C T, et al. Drop test and impact life prediction model for QFN packages [J]. Surface Mount Technology, 2003, 16(3): 31-39.

[10] Pitarresi J, Geng P, Beltman W, et al. Dynamic modeling and measurement of personal computer mother-boards [C]//52nd ECTC. San Diego: [s. n.], 2002: 597-603.

[11] Noh Bo-In, Yoon Jeong-Won, Ha Sang-Ok, et al. Effects of different kinds of underfills and temperature-humidity treatments on drop reliability of board-level packages[J]. Journal of Electronic Materials, 2010, 40(2): 224-231.

[12] Kwak Y D, Park J B, Lee S J. Dynamic responses of PCB under product-level free drop impact [J]. Microelectronics Reliability, 2010, 50(7): 1028-1038.

[13] 哈宽富. 金属力学性质的微观理论[M]. 北京: 科学出版社, 1983.

Ha Kuanfu. Microscopic theory of mechanical properties of metals [M]. Beijing: Science Press, 1983.

[14] 余永宁, 毛卫民. 材料的结构[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.

Yu Yongning, Mao Weimin. Structures of materials [M]. Beijing: Metallurgy Press, 2001.

[15] 马晓青, 韩峰. 高速碰撞动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.

Ma Xiaoqing, Han Feng. Dynamics of high-velocity impact [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998.