

文章编号: 1001-1455(2009)05-0542-04

SnAgCu 焊料的动态力学性能*

罗斌强^{1,2}, 胡时胜¹

(1. 中国科学技术大学中国科学院材料力学行为和 Design 重点实验室, 安徽 合肥 230026;

2. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 对 SnAgCu 焊锡材料在应变率 0.001、600、1 200、1 800 s⁻¹ 下的拉伸和压缩力学性能进行了测试, 得到了不同应变率下的应力应变曲线。结果表明, 该材料不仅具有明显的应变率效应, 而且其动、静态的塑性硬化模量差异很大。金相分析显示: 准静态压缩时, 塑性变形主要由晶粒的转动、变形和晶界的滑移控制; 而动态压缩时, 可观察到材料内部的枝状晶粒被折断为大量次级晶枝, 呈现出明显不同于准静态情况下的变形机制。

关键词: 爆炸力学; 动态力学性能; Hopkinson 杆; 焊锡材料; 应变率效应; 金相分析

中图分类号: O347.3 **国标学科代码:** 130·35 **文献标志码:** A

1 引 言

SnPb 焊料由于其物理性能稳定、成本低廉、制造工艺简单, 在集成电路中作为机械连接和电路导通材料得到了大规模使用。然而 SnPb 焊料中 Pb(铅) 的使用危害人体健康, 同时不易分解, 污染环境, 因此无铅焊料的研制越来越受到重视。过去对焊锡材料在冲击载荷下的力学性能的研究主要集中在准静态下的力学性能和相应的本构关系^[1-4]。如今便携式电子产品如手机、笔记本电脑等广泛使用, 当不慎跌落或是碰撞时, 焊料节点会受到冲击载荷作用, 因此有必要开展焊锡材料在冲击载荷下的力学性能研究, 但这方面的研究不多且研究的主要对象是含铅焊料^[5-6]。本文中拟对无铅焊料 97Sn-2.5Ag-0.5Cu 在准静、动态下进行拉伸、压缩测试, 得到拉伸、压缩条件下的应力应变曲线, 进行相关分析, 并通过金相观察, 以期从微观角度对动、静态力学性能的差异给出合理解释。

2 实验装置与原理

准静态拉伸和压缩实验在材料试验机上进行, 动态压缩实验在分离式 Hopkinson 压杆上进行, 动态拉伸实验则是在经我们改进的套管式 Hopkinson 拉杆上进行。

套管式霍普金森拉杆装置如图 1 所示, 实心子弹打击撞击块, 给套管施加一个压缩脉冲, 之后又通过连接块和螺栓给套管内的拉杆施加一个拉伸脉冲, 对试件进行冲击拉伸加载, 典型实验波形如图 2 所示。如果不考虑入射脉冲的产生方式, 霍普金森拉杆的实验原理和霍普金森压杆的实验原理是一样的。动态压缩试样为短圆柱状, 尺寸为 $\varnothing 12 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 。动态拉伸试样的形状如图 3 所示^[7], 实验段尺寸为 $\varnothing 4 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 。

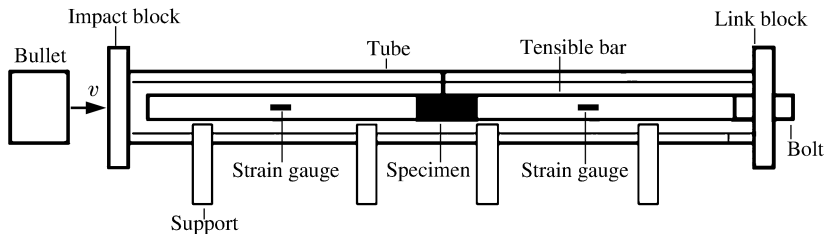


图 1 套管式 Hopkinson 拉杆装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a sleeve Hopkinson tensile bar system

* 收稿日期: 2008-04-28; 修回日期: 2008-09-12

作者简介: 罗斌强(1985—), 男, 博士研究生。

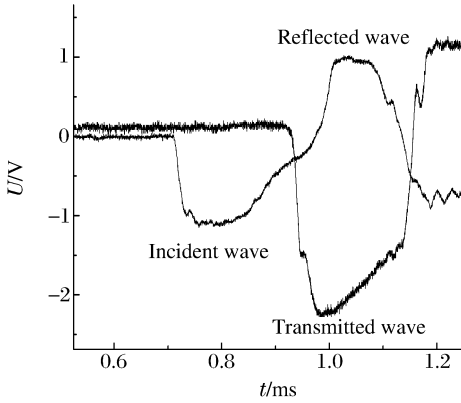


图 2 套筒式 Hopkinson 拉杆实验典型波形
Fig. 2 Representative experimental waves by the sleeve Hopkinson tensile bar

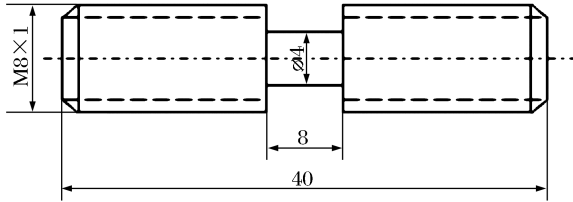
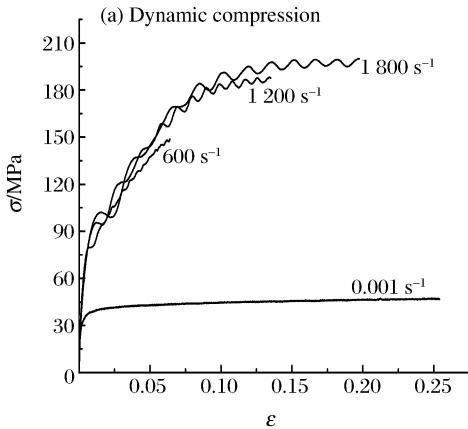


图 3 动态拉伸试样示意图
Fig. 3 Sketch map for a sample in dynamic tensile tests



3 实验结果

图 4 为压缩和拉伸的实验结果。由图可见, 该种焊锡材料具有明显的应变率敏感性, 无论是压缩的还是拉伸的, 其动态的流动应力都比静态的大得多, 而对于一般的金属材料, 其动态的流动应力只比准静态的大百分之几十。另外, 这种材料在准静态条件(即等温情况)下, 无论是压缩还是拉伸, 其应力应变曲线的塑性段为直线, 且塑性硬化模量很小, 接近于理想塑性。但动态条件(绝热过程)下, 其应力应变曲线塑性段的初始部分虽然也为直线, 但其塑性硬化模量远大于准静态的, 这表明, 其动态塑性变形存在不同于准静态塑性变形的新机制。图 4(a) 显示, 动态压缩曲线塑性段的后半部分向上凸, 利用下式^[8]

$$\Delta T = \frac{\beta}{\rho c_p} \int_0^\epsilon \sigma d\epsilon \quad (1)$$

计算得出, 当应变 $\epsilon = 0.15$ 时, 试件内部的绝热温升 $\Delta T = 15^\circ\text{C}$, 材料的熔点只有 217°C , 这表明在高速变形过程中, 塑性功转为热量所导致的温度升高使材料发生了软化。式中 ρ 为密度, $\rho = 7.4 \text{ g/cm}^3$; c_p 是比定压热容, $c_p = 233.6 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$; β 是塑性功转化为热的转化分数, $\beta = 0.9$ 。

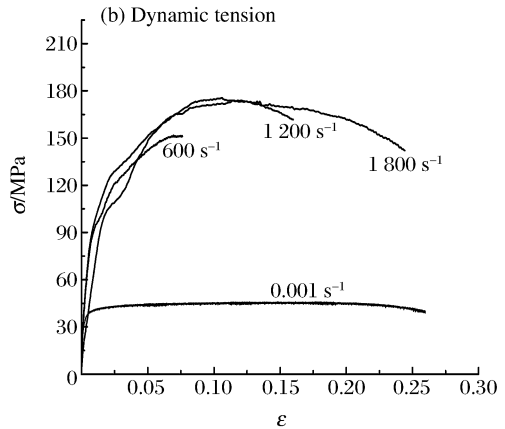


图 4 SnAgCu 焊料在动态条件下的真应力应变曲线

Fig. 4 True stress-strain curves for SnAgCu solder under dynamic conditions

图 4(b) 显示, 动态拉伸曲线的后半部呈现颈缩失稳, 其失稳点的应变 (~ 0.1) 远小于准静态拉伸时的失稳点应变, 表明该材料存在动脆现象, 即在冲击加载情况下, 其韧性降低, 脆性提高。

4 金相观察与分析

图 5 为原始态、准静态压缩和动态压缩后试样的金相照片, 其中灰白色树枝状晶是纯锡 ($\beta\text{-Sn}$) 晶粒, 灰黑色基体部分是 Ag_3Sn 和 Cu_6Sn_5 ^[9]。图 5(a) 表明, 原始态的纯锡晶粒排列是无序的。图 5(b) 则表明试样受准静态加载时, 材料的变形主要以晶粒自身的转动和变形(被压扁)为主, 晶粒的排序及变形

具有明显的方向性。鉴于晶粒的这种变形机制并不需要应力有大的增加就可以维持,因此准静态条件下材料的应力应变曲线塑性段表现出理想塑性的特性。图 5(c)表明材料的高速变形机制完全不同于准静态的。在动态加载情况下,试样必须在很短时间内发生较大变形,SnAgCu 材料内部树枝状的锡晶粒已来不及转动而只能以被折断为大量次级晶枝的方式来适应,这样的变形机制导致其动态的塑性硬化模量远大于准静态的。仔细观察动态条件下的金相照片,在次级晶枝边角上可发现重熔过的痕迹,这说明,材料内部的枝状锡晶粒在折断过程中需要消耗大量的能量。以上分析表明,新的变形机制不仅解释了塑性硬化模量的明显提高,还解释了该种焊锡材料不同于一般的金属材料的非常明显的应变率敏感性。它的所谓应变率效应中的相当部分是由于这种新的变形机制引起的。

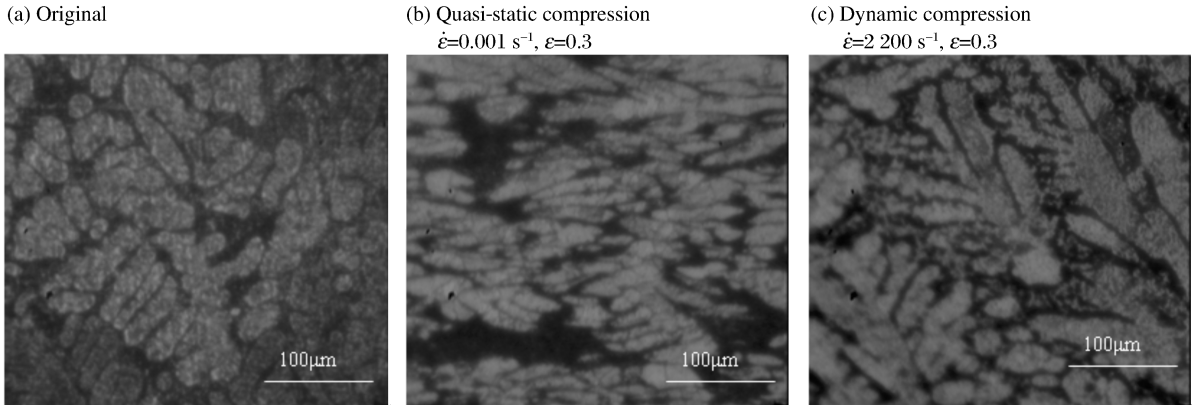


图 5 不同条件下 SnAgCu 焊料的金相照片

Fig. 5 Metallographic photos for SnAgCu solder under different conditions

5 结 论

通过对 SnAgCu 焊锡材料在准静、动态条件下的压缩和拉伸实验,发现该种材料在准静态加载和冲击加载时有完全不同的响应:准静态条件下材料屈服强度较低,并且塑性段显示出理想塑性的特性;冲击载荷下材料的屈服强度大幅度提高,应变率效应明显,加工硬化和绝热温升及动脆失稳对塑性段有显著影响。通过对相应的试样做金相分析,发现在准静态压缩时,塑性变形主要由晶粒的转动、变形和晶界的滑移控制。而动态压缩时,可观察到材料内部的枝状晶粒因来不及转动而只能以被折断为大量次级晶枝的方式适应,呈现出明显不同于准静态情况下的变形机制。动、静态变形的 2 种机制可对材料的动、静态力学性能中加工硬化表现出的明显差异给出一个准确的解释。

在此对沈阳工业大学王长义老师在金相分析方面给予的指导谨表感谢!

参考文献:

- [1] Yi S, Luo G X, Chian K S, et al. A viscoplastic constitutive model for 63Sn37Pb eutectic solders[J]. Journal of Electronic Packaging, 2002, 124(2):91-96.
- [2] Amagai M, Watanabe M, Omiya M, et al. Mechanical characterization of Sn-Ag-based lead-free solders[J]. Microelectronics Reliability, 2002, 42(6):951-966.
- [3] Rodgers B, Flood B, Punch J, et al. Experimental determination and finite element model validation of the anand viscoplasticity model constants for SnAgCu[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-electronics and Micro-system, 2005:490-496.
- [4] Chen X, Chen G, Sakane M. Prediction of stress-strain relationship with an improved anand constitutive model for lead-free solder Sn-3.5Ag[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2005, 28(1):111-116.
- [5] Wang B, Yi S. Dynamic plastic behavior of 63wt%Sn37wt%Pb eutectic solder under high strain rate[J]. Journal of

Materials Science Letters, 2002,21(9):697-698.

- [6] Siviour C R, Walley S M, Proud W G, et al. Mechanical properties of SnPb and lead-free solders at high rates of strain[J]. Physics D: Applied Physics, 2005,38(22):4131-4139.
- [7] 胡时胜,邓德涛,任小彬. 材料冲击拉伸实验的若干问题探讨[J]. 实验力学,1998,13(1):9-14.
HU Shi-sheng, DENG De-tao, REN Xiao-bin. A study on impact tensile test of materials[J]. Chinese Journal of Experimental Mechanics, 1998,13(1):9-14.
- [8] Meyers M A. Dynamic behavior of materials[M]. US: Wiley, John & Sons, Incorporated, 1994:377.
- [9] Fouassier O, Heintz J M, Chazelas J, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of SnAgCu alloys [J]. Journal of Applied Physics, 2006,100(4):043519(8).

Dynamic mechanical properties of SnAgCu solder

LUO Bin-qiang^{1,2}, HU Shi-sheng^{1*}

- (1. CAS Key Laboratory for Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;
2. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mainyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: The split Hopkinson bar technique and the material test system were applied to explore experimentally the mechanical properties of SnAgCu solder at room temperature. The stress-strain curves obtained at different strain rates indicate that SnAgCu solder exhibits a strong strain-rate effect and its plastic hardening moduli have great difference under quasi-static and impact loads. Metallographic analysis shows that the plastic deformation in SnAgCu solder under quasi-static compression is governed by the rotation and deformation of crystal grains, and the dendrite deformation has directivity. While under dynamic compression, the deformation mechanism is distinctly different from that under quasi-static compression, the dendrite as the original phase is no directivity and the primary dendrite arms are broken into secondary dendrite.

Key words: mechanics of explosion; dynamic mechanical property; Hopkinson bar; SnAgCu solder; strain rate effect; metallographic analysis

* Corresponding author: HU Shi-sheng

E-mail address: sshu@ustc.edu.cn

(责任编辑 张凌云)