

SAC305 焊料的准静态压缩性能及本构关系研究

王超 杨雪霞 张伟伟 孙勤润 刘昭云 彭银飞

(太原科技大学应用科学学院)

摘要 采用 UTM6202 电子万能试验机对 SAC305(Sn3.0Ag0.5Cu) 铸态无铅焊料试样在恒温(20~140 °C)下进行压缩试验。根据不同工况下的试验数据,对无铅焊料的流变应力、应变速率和变形温度的关系进行拟合,计算 Arrhenius 本构方程参数。结果表明,温度和应变速率对无铅焊料 SAC305 合金的真应力-应变关系具有显著的相关性。焊料的屈服强度随着应变温度的升高而降低,随着应变速率的增大而增大。将应变速率为 5×10^{-4} 、 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时测得的无铅焊料应力-应变关系和试验进行了比较,发现计算值与试验值符合较好。说明该双曲正弦本构关系可用于描述无铅焊料热变形过程中的流变应力,热变形激活能为 61.863 23 kJ/mol。

关键词 SAC305 无铅焊料;压缩性能;流变应力;力学性能

中图分类号 TG245;TG113.25

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.05.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Quasi-static Compression Properties and Constitutive Relations of SAC305 Solder

Wang Chao, Yang Xuexia, Zhang Weiwei, Sun Qinrun, Liu Zhaoyun, Peng Yinfei

(College of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology)

Abstract: The as-cast SAC305(Sn3.0Ag0.5Cu) lead-free solder was compressed at constant temperature (20~140 °C) by UTM6202 electronic universal testing machine. According to the experimental data under different working conditions, the flow stress, strain rate and deformation temperature of lead-free solder were fitted, and the parameters of Arrhenius constitutive equation were calculated. The results reveal that the true stress-strain relationship of lead-free solder SAC305 is significantly correlated with temperature and strain rate. The yield strength of solder is decreased with the increase of strain temperature and increased with the increase of strain rate. The stress-strain relationship of lead-free solder measured at the strain rates of $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ and $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ was compared with the experimental ones, and the calculated values were consistent with the experimental ones, indicating that the hyperbolic sine constitutive relation can be used to describe the flow stress of lead-free solder during hot compression deformation, where the thermal deformation activation energy Q is 61.863 23 kJ/mol.

Key Words: SAC305 Lead-free Solder, Compression Properties, Flow Stress, Mechanical Properties

在电子元器件中,焊点起到机械连接、电气导通、信号传递等关键作用,焊点的失效会直接导致电子元器件的损坏^[1]。电子设备的可靠性与焊点关系紧密,因此对于无铅焊料力学性能的研究尤为重要。王志海等^[2]通过纳米压痕法测量 SAC305 焊料的力学性能,得到无铅焊料在 BGA 封装中的力学性能参数。李少亮等^[3]对 Sn-3.5Ag-0.5Cu 无铅焊料进行拉伸试验,得到焊料的力学参数。李钊等^[4]基于纳米压入法研究 SAC305 焊料高温条件下的力学性能,发现随着温度升高,弹性模量和硬度逐渐降低,温度对焊料的力学性能影响显著。申林林等^[5]基于动态压痕试验,对低 Ag 无铅焊料动态

力学性能研究,发现应变速率对无铅焊料应力应变有较大的影响。以上研究均表明温度和应变速率对焊料的力学性能影响最大,但关于无铅焊料在不同应变速率和不同温度条件下恒温压缩时的力学性能研究较少。

针对以上问题和焊点服役工况(无铅焊料在服役期间,焊点温度可达 20~140 °C^[6]),本课题将对 SAC305 无铅焊料在考虑温度和应变速率条件下做恒温压缩试验,对焊料的力学性能进行研究,将压缩后焊料的流变应力和试验前所设置的温度、应变速率三者的关系进行分析,确定本构关系并推导出焊料流变应力表达式,为焊点可靠性研究提供参考。

收稿日期:2021-11-23;**修改稿收到日期:**2021-12-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11602157,11872261,11802194);山西省自然科学基金面上项目(20210302123220)

第一作者简介:王超,男,1993 年出生,硕士研究生,太原(030024),E-mail:807805746@qq.com

通信作者:杨雪霞,女,1985 年出生,副教授,太原(030024),E-mail:yangxuexia0124@126.com

引用格式:王超,杨雪霞,张伟伟,等. SAC305 焊料的准静态压缩性能及本构关系研究[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(5):601-605.

WANG C, YANG X X, ZHANG W W, et al. Quasi-static compression properties and constitutive relations of SAC305 solder[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(5):601-605.

1 试验方法

采用 UTM6202 电子万能试验机对无铅焊料 SAC305 进行准静态力学性能测试,将铸态的无铅焊条车加工成尺寸为 $\phi 5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的试样。应变速率分别为 1×10^{-3} 、 2×10^{-4} 、 5×10^{-4} 、 5×10^{-5} 、 $8 \times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$,在温度分别为 20、60、100、140 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下进行恒温压缩试验,总压缩变形量为 15%。试验过程中,在试样两端涂抹润滑剂,以减少试样与机器压头之间的摩擦^[6]。以 10 $^{\circ}\text{C/s}$ 将试样加热到预定温度并保温 10 min 再进行热压缩试验^[7]。

2 结果与讨论

2.1 SAC305 焊料真应力应变试验原理

焊料的工程应力-应变曲线计算如下:

$$\begin{cases} \sigma = F/A_0 \\ \epsilon = (L_0 - L)/L_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, F 为压力, N; σ 为工程应力, MPa; ϵ 为工程应变; A_0 为试样原始横截面积, mm^2 ; L 为瞬时长度, mm; L_0 为试样的原始长度, mm。

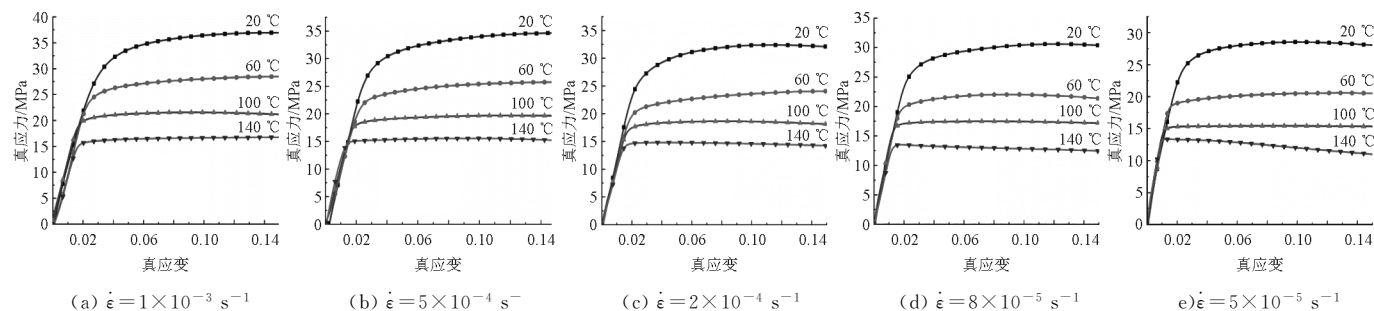


图 1 同一应变速率、不同温度下 SAC305 焊料的真应力-真应变曲线

Fig.1 True stress-strain curves of SAC305 solder at the same strain rate and different temperatures

2.3 应变速率对 SAC305 焊料力学性能的影响

图 2 为无铅焊料 SAC305 焊料在热压缩变形后经处理得到同一温度不同应变速率下的真应力-应变曲线。可以看出,在一定的温度下曲线先迅速上升后趋于

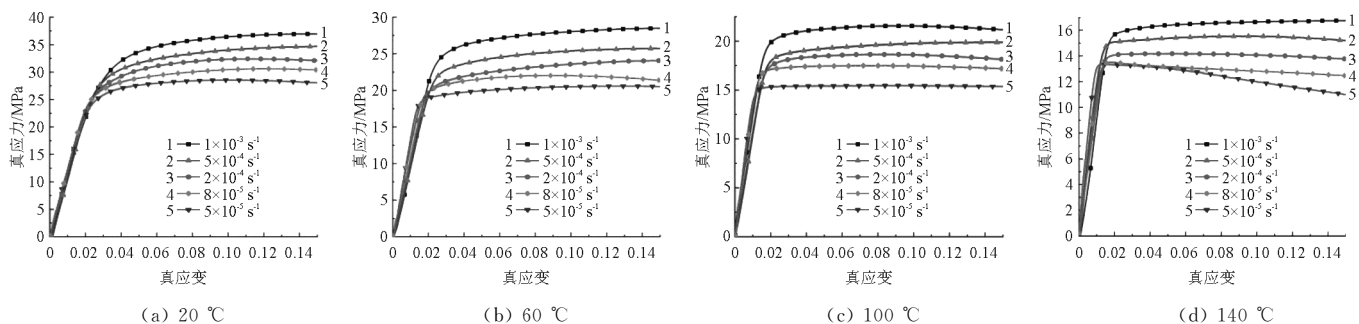


图 2 不同温度下应变速率对 SAC305 合金真应力-应变曲线的影响

Fig.2 Effects of strain rates on true stress-strain curves of SAC305 alloys at different temperatures

试样在热压缩变形时的应力-应变关系,根据体积不变和试样压缩过程中仍发生均匀变形的假设,对于圆柱试样,压缩后仍为圆柱体。用瞬时载荷除以相应的横截面积得到试样真应力-真应变曲线。压缩变形试样的工程应力-应变转换为真应力-真应变转换公式如下:

$$\begin{cases} \sigma_t = \sigma(1 - \epsilon) \\ \epsilon_t = -\ln(1 - \epsilon) \end{cases} \quad (2)$$

式中, σ_t 、 ϵ_t 分别为真应力和真应变。

2.2 温度对 SAC305 力学性能的影响

图 1 为无铅焊料 SAC305 在同一应变速率不同温度下的真应力-真应变曲线。可以看出,同一应变速率下,在初始应变期($\epsilon < 0.02$),流变应力呈线性快速增长。随着温度升高,弹性阶段随着温度的升高而缩短,真应力水平明显下降。弹性阶段结束后,曲线在($\epsilon \geq 0.05$)时均存在平滑阶段。在这个时期,无铅焊料的应变会随着时间而增大,但应力保持不变或略降,此时 SAC305 合金进入塑性流动阶段,塑性变形速率与加载的应变速率一致^[8],表现出稳态流变特征。即加工硬化与动态再结晶软化作用已达到动态平衡。当温度在 100、140 $^{\circ}\text{C}$ 时,因焊料的温度接近熔点,内部组织不稳定,塑性阶段的应力曲线有所降低。

平缓。因为在变形开始阶段,位错密度逐渐增大,大量位错开始缠结,加工硬化占主导地位,应力随着应变的增加快速增大。当流变应力达到峰值时,随着动态再结晶不断进行,软化速率与加工硬化速率基本相同,甚至

占主导地位。具体表现为流变应力保持平衡或略微下降,从而达到稳态流动阶段^[9]。在相同的变形温度下,SAC305 合金的流变应力随着应变速率的增加而增大。说明在试验条件范围内合金具有正的应变速率敏感性。应变速率越大,合金的峰值应力越大,因为合金在塑性变形时无充分时间进行位错的湮灭、抵消运动,使得合金的变形抗力增加。在热加工过程中,影响流变应力变化的主要原因有两个^[6]:一是由位错增殖及位错间相互作用导致的加工硬化;二是在热激活和外加应力作用下,位错合并、重组导致的动态软化;两者同时发生、彼此竞争。

3 Arrhenius-type 本构模型

根据材料的热变形过程特征,HERKOMMER D 等^[10]提出用包含热变形激活能 Q 和温度 T 双曲正弦形式的修正 Arrhenius 关系^[5]。描述材料热变形过程中流变应力、应变温度和应变速率之间的关系如下:

$$\dot{\epsilon} = AF(\sigma)\exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (3)$$

Zener-Hollomon 参数^[11]是表征应变速率和温度对变形过程的综合影响,应变速率 $\dot{\epsilon}$ 与温度 T 之间的关系可用 Z 参数表示:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (4)$$

式中, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, s^{-1} ; Q 为热变形激活能, J/mol ; R 为摩尔气体常数, $8.314 J/(mol \cdot K)$ 。

$F(\sigma)$ 为应力函数:

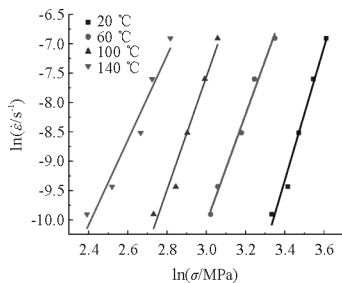


图3 $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ 曲线

Fig.3 $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ curves

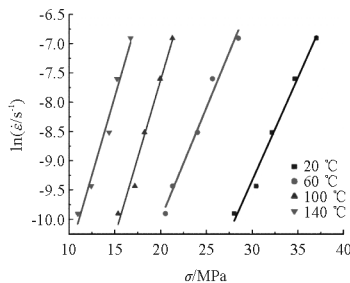


图4 $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ 曲线

Fig.4 $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ curves

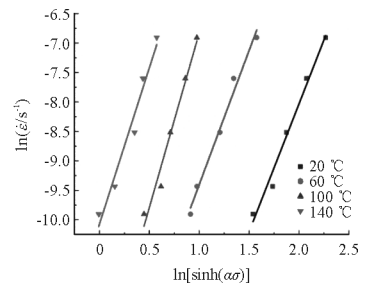


图5 $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 曲线

Fig.5 $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ curves

$$Q = Rn_1 \left[\frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial (1000/T)} \right]_T = R \left\{ \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]} \right\}_{\dot{\epsilon}} \left\{ \frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial (1000/T)} \right\}_T \quad (8)$$

由式(8)可知,当 Q 与 T 无关时, $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 与 $1000/T$ 呈线性关系,且 K 为直线 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$ 的斜率; n 为直线 $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的斜率。将 n 值代入 $\alpha = \beta/n$ 中重新得到一个调整后的 $\alpha = 0.08$, 将调整后的 α 值重新带入式(8)中,绘制调整后的 $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

$$F(\sigma) = \begin{cases} A_1 \sigma^{n_1} & (\alpha\sigma < 0.8) \\ A_2 \exp(\beta\sigma) & (\alpha\sigma > 1.2) \\ A [\sinh(\alpha\sigma)]^n & (\text{通用}) \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\alpha = \beta/n_1$, A_1 , A_2 , A , n_1 , β 和 n 为常数;幂函数适用于相对低应力水平的描述,而指数函数更适合模拟高应力水平。相比之下,双曲正弦函数具有更好的模拟水平,能较好地描述常规的热加工变形,如挤压、扭转、压缩等^[12]。将式(5)带入式(3)中,两边取对数得到下式:

$$\ln Z = \begin{cases} \ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{RT} = \ln A_1 + n_1 \ln \sigma & (\alpha\sigma < 0.8) \\ \ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{RT} = \ln A_2 + \beta\sigma & (\alpha\sigma > 1.2) \\ \ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{RT} = \ln A + n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] & (\text{通用}) \end{cases} \quad (6)$$

材料常数 n_1 , β 和 n 可通过对式(6)在给定温度下进行微分得到:

$$n_1 = \left(\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln \sigma} \right)_T, \beta = \left(\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \sigma} \right)_T, n = \left\{ \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]} \right\}_T \quad (7)$$

对式(7)中 $\ln \dot{\epsilon}$ 和 σ 进行线性拟合得到 β , 对 $\ln \dot{\epsilon}$ 和 $\ln \sigma$ 进行线性拟合得到 n_1 , 应变为 0.15 时无铅焊料 $\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}$ 线性拟合结果见图 3, $\sigma - \ln \dot{\epsilon}$ 线性拟合见图 4。对图中各直线斜率的倒数求平均值可得 $n_1 = 9.294$, $\beta = 0.4947$ 。根据公式 $\alpha = \beta/n$ 可以得到 $\alpha_1 = 0.0533$ 。应力指数 n 通过对 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - \ln \dot{\epsilon}$ 图线性拟合的斜率估算,得到 $n = 6.6304$, 见图 5。

通过对式(6)进行微分,变形活化能可表示如下:

和 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$ 图, 见图 6 和图 7。计算可得, 图 6、图 7 斜率 $n = 4.2846$, $K = 1736.7$, 则 $Q = RnK = 61863.23 J/mol$ 。

由式(6)可知:

$$\ln Z = \ln A + n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] \quad (9)$$

对 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - \ln Z$ 进行拟合, 见图 8。由图 8 可知, $\ln A = 10.985$, 为直线 $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的截距。最终确定的材料常数为: $n = 4.2846$, $Q = 61863.23 J/mol$, $\ln A = 10.985$, $\alpha = 0.08$ 。

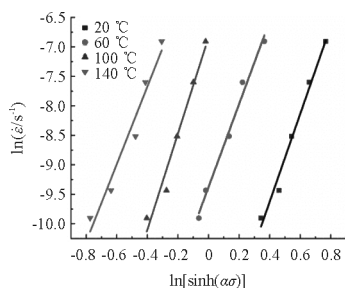


图 6 $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

Fig.6 $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ curves

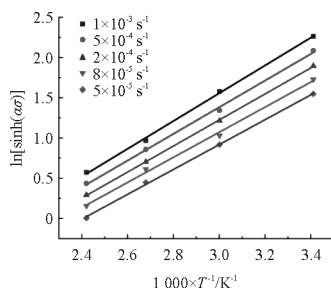


图 7 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$

Fig.7 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$ curves

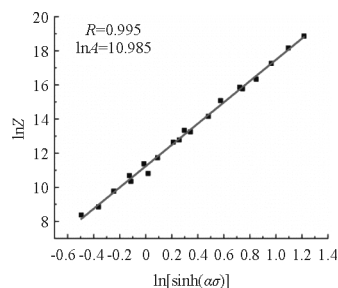


图 8 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - \ln Z$ 曲线

Fig.8 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - \ln Z$ curves

因此最适合描述的本构方程如下:

$$\dot{\epsilon} = e^{10.985} + [\sinh(0.08\sigma)]^{4.2846} \exp\left(-\frac{61\,863.23}{RT}\right) \quad (10)$$

$$\sigma = 12.5$$

$$\ln\left\{\left(\frac{Z}{58\,982.73}\right)^{1/4.2846} + \left[\left(\frac{Z}{58\,982.73}\right)^{2/4.2846} + 1\right]^{1/2}\right\}$$

4 预测结果与试验结果对比

根据拟合应变为 0.15 时焊点的应力-应变关系的方法,对应变为 0.05、0.075、0.08、0.09、0.1、0.11、0.125、

0.15 时的应力应变关系也基于修正 Arrhenius 方程进行拟合本构方程,计算不同变形应变下本构方程材料常数。焊点的材料参数 $\ln A$ 、 n 、 α 、 Q 和真应变之间的关系可以通过应变补偿进行多项式拟合:

$$\begin{aligned} n &= B_0 + B_1\epsilon + B_2\epsilon^2 + B_3\epsilon^3 + B_4\epsilon^4 + B_5\epsilon^5 \\ \alpha &= C_0 + C_1\epsilon + C_2\epsilon^2 + C_3\epsilon^3 + C_4\epsilon^4 + C_5\epsilon^5 \\ Q &= D_0 + D_1\epsilon + D_2\epsilon^2 + D_3\epsilon^3 + D_4\epsilon^4 + D_5\epsilon^5 \\ A &= E_0 + E_1\epsilon + E_2\epsilon^2 + E_3\epsilon^3 + E_4\epsilon^4 + E_5\epsilon^5 \end{aligned} \quad (11)$$

其中,参数值见表 1。图 9 为采用模型计算的流动应力曲线和试验结果的对比。可以看出,预测值和试验结果吻合较好。

表 1 α, n, Q, A 多项式拟合参数

Tab.1 Polynomial fitting coefficients of α, n, Q, A

n						α					
B_0	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
8.706	-75.609	1 108.472	-9 747.135	44 278.995	-76 800.731	0.097	-1.528	34.344	-412.216	2 205.119	-4 158.112
$Q(\times 10^6)$						$A(\times 10^6)$					
D_0	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	E_0	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5
0.067	-0.13	1.407	4.55	-117.501	358.879	-0.803	57.488	-1 480.24	17 170.9	-88 490.2	164 855

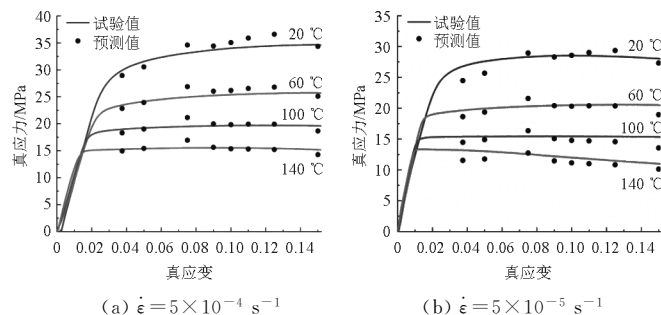


图 9 相同应变速率、不同温度的试验值与计算值对比曲线

Fig.9 Comparison curves between the experimental and calculated values at same strain rate and different temperatures

可以看出,在 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 和 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时,拟合出的 Arrhenius 本构方程的计算值和试验值在 4 种应变速率下都接近,误差均在 10% 以内。因此,修正后的 Arrhenius 本构方程可以很好地预测该温度下无铅焊料的应力-应变关系。

5 结 论

(1) 无铅焊料 SAC305 的流变应力与变形温度和变

形速率有明显的相关性。其流变应力在变形初期随着变形程度的增加迅速升高,达到峰值后趋于平缓。当应变速率降低,温度升高时,流变应力与屈服强度均会减小。

(2) 给出了无铅焊料 SAC305 的流变应力、变形温度和应变速率之间关系式。试验结果和计算结果误差在 10% 内,修正后的 Arrhenius 本构方程可很好预测该温度下无铅焊料的应力-应变关系。

参 考 文 献

- [1] ABTEW M, SELVADURAY G. Lead-free solders in microelectronics[J]. Materials Science and Engineering, 2000, R27(5): 95-141.
- [2] 王志海, 钱江蓉, 兰欣, 等. 纳米压痕法测量 SAC305 焊料的力学性能[J]. 电子元件与材料, 2020, 39(6): 72-78.
- [3] 李少亮, 宗晓明, 王俊涛, 等. Sn-3.5Ag-0.5Cu 无铅焊料力学性能与组织特征研究[J]. 电子工艺技术, 2015, 36(3): 134-137.
- [4] 李钊, 袁国政, 肖革胜, 等. 基于纳米压入法 Sn-Ag-Cu 无铅焊料高温力学性能的研究[J]. 实验力学, 2016, 31(4): 467-474.

7050 铝合金超厚板取样位置对阳极氧化膜耐蚀性的影响

李宏伟¹ 陈高红^{2,3}(1.哈尔滨飞机工业集团有限责任公司; 2.中国航发北京航空材料研究院;
3.北京市先进铝合金材料及应用工程技术研究中心)

摘要 以 200 mm 厚 7050-T7451 铝合金超厚板作为研究对象,在合金不同厚度、不同取向取样,研究不同取样位置处铝合金的显微组织特征,而后进行硫酸阳极氧化处理,并研究取样位置对氧化膜耐蚀性的影响。采用动电位极化、电化学阻抗谱(EIS)来评估其耐蚀性能。结果发现,从表层到中心层,铝合金试样组织结构有所不同;经过阳极氧化处理后,在表层 *L-T* 面试样腐蚀电流密度最低,阻抗最高,具有最好的耐蚀性能。

关键词 7050 铝合金;超厚板;取样位置;阳极氧化膜;耐蚀性

中图分类号 TG249.9;TG146.21;TG113.23⁺1

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.05.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Sampling Position in 7050 Aluminum Alloy Extra-thick Plate on Corrosion Resistance of Anodic Alumina Film

Li Hongwei¹, Chen GaoHong^{2,3}(1.Harbin Aircraft Industry Group Co., Ltd.; 2.Beijing Institute of Aeronautical Material;
3.Beijing Engineering Research Center of Advanced Aluminum Alloys and Application)

Abstract: 7050-T7451 aluminum alloy super-thick plate with thickness of 200 mm was taken as the research object, and samples were cut from different thickness and different orientation to investigate the microstructure characteristics of aluminum alloy at different sampling positions. Then the samples were anodized in sulfuric acid, and the influence of sampling position on corrosion resistance of anodic alumina film was also analyzed. The corrosion resistance was evaluated by potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). The results reveal that the microstructure of the aluminum alloy samples is different to some extent from the surface to the center. After anodizing, the corrosion current density of *L-T* surface is the lowest, while the impedance is the highest, indicating the desirable corrosion resistance.

Key Words: 7050 Aluminum Alloy, Extra-thick Plate, Sampling Position, Anodic Film, Corrosion Resistance

7050 铝合金是在 7075 合金的基础上,通过优化主合金元素占比并进一步降低 Fe、Si 等杂质含量,开发出来的一种改进型 Al-Zn-Mg-Cu 系高强铝合金^[1]。7050

铝合金的强度和断裂韧度高,抗剥落腐蚀以及应力腐蚀性能较好^[2,3]。此外,合金热处理过程中的淬火敏感性小^[4]。因此,7050 铝合金厚板广泛用于各种航空航天

收稿日期:2021-11-19;修改稿收到日期:2021-12-16

第一作者简介:李宏伟,男,1974 年出生,高级工程师,哈尔滨(150066),E-mail:15046786858@139.com

引用格式:李宏伟,陈高红. 7050 铝合金超厚板取样位置对阳极氧化膜耐蚀性的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(5):605-609.

LI H W, CHEN G H. Effects of sampling position in 7050 aluminum alloy extra-thick plate on corrosion resistance of anodic alumina film[J].
Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(5):605-609.

- [5] 申林林. 基于动态压痕试验的低银无铅焊料动态力学性能研究[D].河北保定:河北大学,2019.
- [6] 骆刚. 42CrMo 热塑性流变及动态再结晶行为研究[D].重庆:重庆大学,2010.
- [7] 张继祥,冯伟,文辉,等. 6016 铝合金高温流变应力行为研究[J]. 热加工工艺,2012, 41(22): 5-8.
- [8] 张莉. 焊锡钎料温度与应变速率相关拉伸性能的本构描述[D].天津:天津大学,2004.
- [9] 余晖, YOUNGMIN K, 于化顺,等. Mg-Zn-Zr-Ce 合金高温变形行为与热加工性能研究[J]. 金属学报, 2012, 48(9): 1 123-1 131.

- [10] HERKOMMER D, PUNCH J, REID M. A reliability model for SAC solder covering isothermal mechanical cycling and thermal cycling conditions[J]. Microelectronics Reliability, 2010, 50(1): 116-126.
- [11] 林高用,周佳,孙利平,等. BFe10-1-1 铜合金热压缩流变应力行为[J]. 材料科学与工艺, 2009, 17(3): 441-444.
- [12] LIU W J. A unified theoretical model for work-hardening of polycrystalline metals[J]. Acta Materialia, 1996, 44(6): 2 337-2 343.

(编辑:刘晨辉)