

蠕变对巴氏合金 ZChSnSb11-6 力学性能和显微组织的影响

王建梅^{1,2}, 薛亚文^{1,2}, 马立新^{1,2}, 唐 亮^{1,2}

(1. 太原科技大学 机械工程学院, 太原 030024;

2. 太原科技大学 重型机械教育部工程研究中心, 太原 030024)

摘 要: 针对巴氏合金 ZChSnSb11-6 工作过程中的蠕变现象, 对合金进行蠕变实验。基于蠕变实验所得蠕变曲线, 证实 ZChSnSb11-6 在实际工作条件下会发生明显的蠕变现象, 同时利用 WDW-E100D 试验机, 获得 ZChSnSb11-6 蠕变前后的屈服强度等力学性能。通过分析合金蠕变、力学性能和显微组织之间的关系, 得知蠕变明显降低 ZChSnSb11-6 的强度、塑性及抗弹性变形能力, 并得到合金蠕变机理, 明确 ZChSnSb11-6 蠕变变形是应变硬化与再结晶回复长时间交替作用的结果。通过计算合金的应变硬化指数, 证实蠕变使合金均匀变形的能力降低, 增大合金发生断裂破坏的可能性。同时, 基于硬度试验获得合金硬度随温度变化的计算公式, 确定 ZChSnSb11-6 的蠕变临界温度范围为 50~60℃。通过观察 ZChSnSb11-6 蠕变前后的显微组织, 发现蠕变使合金组织中 SnSb 和 Cu₆Sn₅ 明显减少, 导致合金力学性能降低。

关键词: 巴氏合金; ZChSnSb11-6; 蠕变; 力学性能; 显微组织

中图分类号: TG146

文献标志码: A

Influence of creep on mechanical properties and microstructures of Babbitt alloy ZChSnSb11-6

WANG Jian-mei^{1,2}, XUE Ya-wen^{1,2}, MA Li-xin^{1,2}, TANG Liang^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China ;

2. Heavy Machinery Engineering Research Center of Education Ministry,
Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: According to the creep phenomenon of Babbitt alloy ZChSnSb11-6 in operation, the creep experiment of ZChSnSb11-6 was carried out. Based on the creep behavior of ZChSnSb11-6, the results validate that such alloy will produce obvious creep during its actual operation. Meanwhile, the mechanical performances, such as yield strength of ZChSnSb11-6 before and after creep, were acquired by using WDW-E100D testing machine. The relationships among creep, mechanical performances and microstructure of alloy were analyzed. The results show that the strength, plasticity and elastic deformation resistance of ZChSnSb11-6 were obviously decreased by creep. What is more, the creep mechanism of ZChSnSb11-6 is obtained, which indicates that the creep deformation of ZChSnSb11-6 is the result of long-time alternative reactions of strain-hardening and recrystallization reply. The strain hardening exponents of ZChSnSb11-6 were calculated. It is verified that the affine deformation capability of alloy decreases. The fracture possibility of alloy increases. At the same time, the calculation formula of alloy hardness change with the temperature is acquired by hardness test of ZChSnSb11-6. The critical temperature of ZChSnSb11-6 creep was determined to be within 50–60 °C. The microstructure of ZChSnSb11-6 before and after creep was observed. The results show that SnSb and Cu₆Sn₅ of ZChSnSb11-6 reduce significantly, and the mechanical properties of alloy decrease.

Key words: Babbitt alloy; ZChSnSb11-6; creep; mechanical property; microstructure

巴氏合金 ZChSnSb11-6 因其良好的减摩特性, 广泛应用于冶金、航天、矿山等重大工业装备轴承。ZChSnSb11-6 的工作温度通常会超过其蠕变临界温度, 工作过程中合金会发生明显的蠕变现象, 对轴承的使用性能和工作寿命会产生严重的负面影响。

目前, SMS、MORGAN 等国外企业已研发了具有抗蠕变性能的巴氏合金, 显著提高了轴承的使用性能, 而我国尚未对巴氏合金的蠕变现象进行深入研究。关于金属蠕变现象, WILSHIRE 等^[1]对金属的蠕变实验方法进行了研究, 总结了减小实验误差的方法; 沙桂英等^[2]通过对镁合金进行蠕变实验, 利用 TEM 观察其微观结构, 获得了镁合金的蠕变特性和蠕变机制; 湛利华等^[3-4]研究了铝合金的蠕变行为, 分析了应力对铝合金蠕变后组织和力学性能的影响; PING 等^[5]研究了 Mg-RE 二元合金中强化相对其高温蠕变性能的影响。

关于金属的蠕变研究主要集中在镁铝合金的蠕变性能和金属蠕变实验方法^[6-11]。目前, 尚未见关于 ZChSnSb11-6 蠕变性能、力学性能和显微结构之间关系的研究报道, 因此, 本文作者基于 ZChSnSb11-6 蠕变实验、拉伸实验、硬度实验及金相实验, 分析了蠕变对 ZChSnSb11-6 力学性能和显微组织的影响。

1 实验

本文作者按照 GB/T 2039—1997^[12], 设计了巴氏合金蠕变试验设备, 主要设备包括 WDW-E100D 型万能试验机、YYU 电阻应变式引伸计、TI200 红外测温仪、电阻式加热带和加热罩等; 试验设备精度满足蠕变试验标准的各项要求, 蠕变试验设备如图 1 所示。试件主要化学成分和实验参数如表 1 和 2 所列。同时, 按照 GB/T 2039—1997^[12]对巴氏合金 ZChSnSb11-6 进行了蠕变实验, 获得了合金的力学行为, 其蠕变曲线如图 2 所示, 实验试件照片如图 3 所示。基于 ZChSnSb11-6 蠕变实验结果, 利用 WDW-E100D 型电子式万能试验机, 测得了 ZChSnSb11-6 蠕变前后的抗拉强度、屈服强度、伸长率及弹性模量。根据拉伸试验数据计算了 ZChSnSb11-6 的应变硬化指数, 且通过 HB-3000B 型布氏硬度计对 ZChSnSb11-6 蠕变前后的硬度进行了测定。同时, 通过自制加热设备(其装置图见图 4), 获得了 ZChSnSb11-6 硬度随温度的变化规律。合金的力学性能与其显微组织密切相关, 应用 MDS 型金相显微镜观察了 ZChSnSb11-6 蠕变前后的显微组织(见图 3(b))。



图 1 蠕变试验设备
Fig. 1 Creep test equipment

表 1 ZChSnSb11-6 的主要化学成分
Table 1 Main chemical compositions of ZChSnSb11-6 (mass fraction, %)

Sb	Cu	Pb	As	Bi	Fe	Sn
10.0–12.0	5.5–6.5	0.35	0.05	0.05	0.08	Others

表 2 ZChSnSb11-6 的实验参数
Table 2 Experimental parameters of ZChSnSb11-6 samples

Sample No.	Creep stress/MPa	Creep temperature/°C	Creep time/h
1	13	60	160
2	13	60	50
3	13	80	160
4	18	60	160
5	20	60	160
6	—	—	—

Creep test of specimen 6 was not carried out.

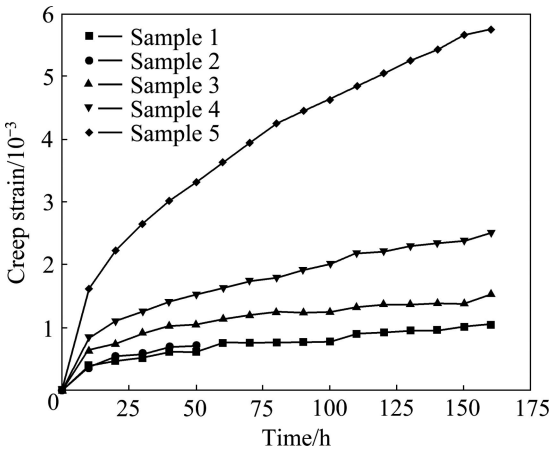


图 2 ZChSnSb11-6 的蠕变曲线
Fig. 2 Creep curves of ZChSnSb11-6

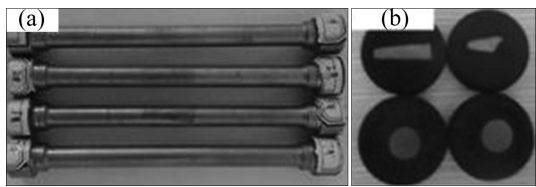


图 3 实验试件照片

Fig. 3 Photos of test samples: (a) Creep experiment; (b) Metallographic experiment

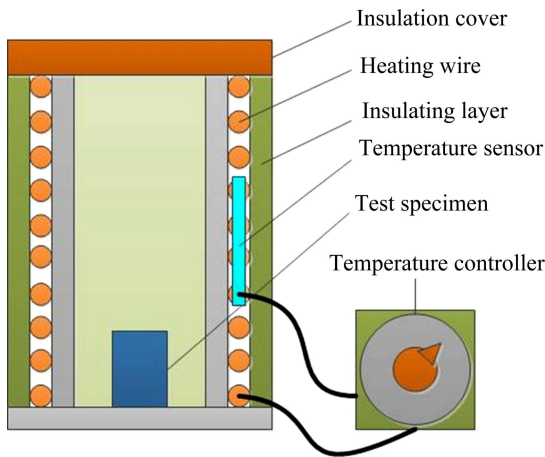


图 4 自制加热设备示意图

Fig. 4 Schematic diagram of self-made heating equipment

2 结果与分析

2.1 力学性能分析

表 3 所列为 ZChSnSb11-6 的力学性能。由表 3 可知, 与试件 6 相比, 试件 1 的抗拉强度降低 34.1%, 屈服强度降低 57.6%, 弹性模量降低 61%; 试件 2 的抗拉强度降低 34.1%, 屈服强度降低 42.4%, 弹性模量降低 63.5%; 而试件 5 的抗拉强度降低 40.9%, 屈服强度降低 60.7%, 弹性模量降低 60%。由此可知, 蠕变会降低 ZChSnSb11-6 的抗拉强度、屈服强度及弹性模量。并且, 蠕变现象越明显, 合金的力学性能降

表 3 ZChSnSb11-6 的力学性能

Table 3 Mechanical performances of ZChSnSb11-6

Sample No.	Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Elasticity modulus/GPa	Strain hardening exponent	Ductility/%
1	58	28	18.7	0.257	2.6
2	58	38	17.5	0.267	1.4
5	52	26	19.2	0.213	3.9
6	88	66	48	0.349	6

低越显著; 合金强度显著减小, 轴承的承载能力必然明显降低。

由表 2 和 3 还可知, 温度和应力相同时, 试件 1 与试件 2 相比, 当蠕变时间增加 215.7% 时, 屈服强度降低了 35.7%, 而抗拉强度基本无变化。因此, 当温度和应力相同时, ZChSnSb11-6 的屈服强度随蠕变时间的增加而不断减小。其中, 试件 1 经历了蠕变第一、二阶段, 试件 2 只经历了蠕变第一阶段。由此可知, ZChSnSb11-6 抗拉强度的变化集中发生在蠕变第一阶段, 而合金的屈服强度在蠕变第一、二阶段都会发生变化。

温度和时间相同时, 与试件 1 与相比, 试件 5 的应力增加 53.8%, 抗拉强度降低 10.3%, 屈服强度降低 7.1%。因此, 温度和时间相同时, 蠕变应力越大, ZChSnSb11-6 的抗拉强度和屈服强度降低越明显。而且, 相比蠕变时间, 应力对 ZChSnSb11-6 屈服强度的影响较大。

试件 5 与试件 6 相比, 弹性模量降低 60%, 蠕变会使 ZChSnSb11-6 的弹性模量降低。但是, 试件 1 与试件 2 相比, 当时间延长 215.7%, 弹性模量增加 6.8%; 与试件 2 相比, 试件 5 的应力增加 53.8%, 弹性模量增加 9.7%; 而且, 与时间相比, 应力对合金弹性模量影响较大。综上可知, 蠕变会使 ZChSnSb11-6 的弹性模量明显降低。虽然弹性模量逐渐增加, 但增加值很小, 远小于合金发生蠕变前的弹性模量。因此, 蠕变使 ZChSnSb11-6 抵抗弹性变形能力降低, 刚度变小, 从而对轴承的相对间隙和油膜的稳定性造成负面影响。

与试件 6 相比, 试件 1 的伸长率降低到 2.6%(降低幅度为 56.7%), 说明蠕变会使 ZChSnSb11-6 塑性降低, 嵌藏性变差, 轴承润滑性能会明显降低。当材料的伸长率小于 6% 时, 则被称为脆性材料, 蠕变使 ZChSnSb11-6 由塑性材料变为脆性材料, 相应的力学性能发生显著变化。在相同应力和温度下, 与试件 2 相比, 时间延长 215.7%, 试件 1 的伸长率增加 85.7%; 与试件 1 相比, 在相同温度和时间下, 试件 5 的应力增加 53.8%, 伸长率增加 57.7%。综上可知, 蠕变会使 ZChSnSb11-6 的伸长率明显降低, 甚至变成脆性材料。当蠕变现象越明显, 合金的伸长率逐渐增加, 但未超过合金发生蠕变前的伸长率(小于 6%), 仍处于脆性材料范围; 而且, 与时间相比, 应力对合金伸长率的影响较大。

2.2 应变硬化指数计算结果分析

应变硬化指数 n 表征材料均匀变形的能力, n 值

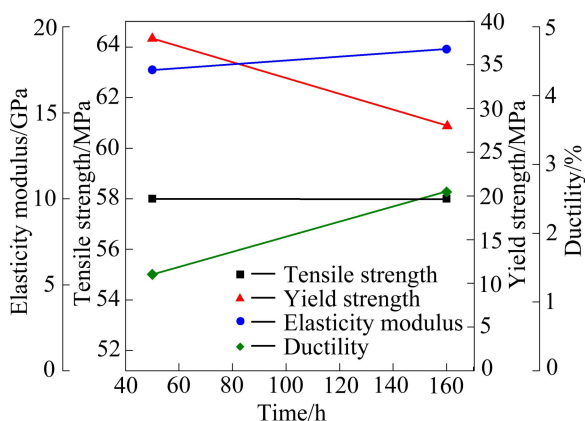


图5 60 °C、应力13 MPa时ZChSnSb11-6蠕变后力学性能随时间的变化

Fig. 5 Change of mechanical properties of ZChSnSb11-6 after creep with time at 60 °C and 13 MPa

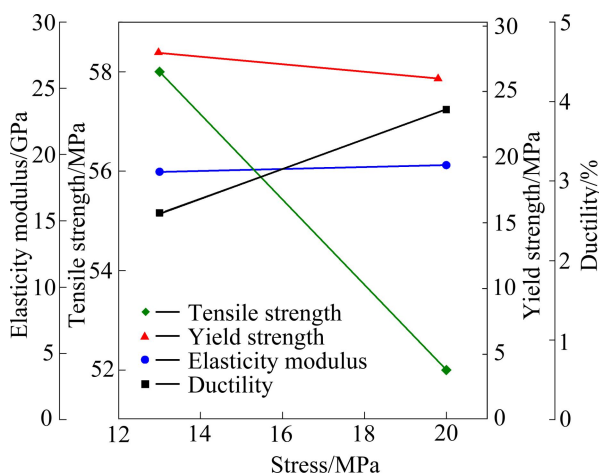


图6 60 °C、160 h时ZChSnSb11-6蠕变后力学性能随应力的变化

Fig. 6 Change of mechanical properties of ZChSnSb11-6 after creep with stress at 60 °C for 160 h

越大, 抗塑性变形能力越强。ZChSnSb11-6 的应变硬化指数计算方法如下^[13]。

试验时真实应力为

$$S_t = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (1)$$

式中: S_t 为真应力; σ 为工程应力; ε 为工程应变。

真实应变为

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon) \quad (2)$$

式中: ε_t 为真应变。

材料塑性应变硬化阶段真应力和真应变的关系为

$$S_t = k\varepsilon_t^n \quad (3)$$

式中: k 为强化系数; n 为应变硬化指数。

将式(3)两端取对数得

$$\lg S_t = \lg k + n \lg \varepsilon_t \quad (4)$$

设 $\lg S_t = y$, $\lg \varepsilon_t = x$, $\lg k = b$, 则式(4)可表示为

$$y = b + nx \quad (5)$$

基于拉伸实验数据, 对 x 和 y 值进行直线拟合可得到 n 值。对比表3中试件1、2、5、6的应变硬化指数可知, ZChSnSb11-6 发生蠕变后, 应变硬化指数减小; 合金蠕变现象越明显, 指数值越小。说明蠕变会降低ZChSnSb11-6 应变强化能力, 即降低抗塑性变形能力; 蠕变越明显, 抗塑性变形能力降低得越显著, 合金发生破坏的危险性增大。

2.3 硬度实验结果分析

在一定范围内, ZChSnSb11-6 硬度越高, 强度越大, 承载能力也越大, 且足够的硬度可以防止磨损; 温度为25 °C时, ZChSnSb11-6 的最佳工作硬度为30HBS左右。由表4可知, 与试件6相比, 试件3的硬度降低到25.9HBS(降低了21.0%), 试件4的硬度降低到23.8HBS(降低了27.4%)。综上可知, 蠕变明显降低了ZChSnSb11-6 的硬度, 合金的承载能力受到严重影响。而且, 蠕变越明显, 合金硬度降低越显著。

表4 25 °C时ZChSnSb11-6 的硬度

Table 4 Hardness of ZChSnSb11-6 at 25 °C

Sample No.	Hardness, HBS
3	25.9
4	23.8
6	32.8

通常硬度开始显著降低的温度为再结晶温度, 再结晶温度一般为 $(0.3 \sim 0.4)T_m$ (T_m 为金属熔点)^[14-15]。由图7可知, 50~60 °C时, ZChSnSb11-6 的硬度显著降低, 可以确定ZChSnSb11-6 的再结晶温度为50~60 °C。通过对实验数据进行多项式拟合, 得到了硬度随温度变化的计算公式(式(6)), 进而可以估算合金在不同工作温度下的硬度和使用寿命。

$$y_H = 30.06 + 0.15x_t - 5.78x_t^2 - 9.06x_t^3 + 7.99x_t^4 \quad (6)$$

式中: y_H 为布氏硬度; x_t 为工作温度。

2.4 显微组织分析

图8所示为试件6的显微组织。由图8可以看出, 在黑色 α 固溶体(Sb溶于Sn的固溶体)基体上分布着白色多边形晶体 β 相(SnSb)和白色颗粒状 ε 相(Cu_6Sn_5)。由图8可知, 发生蠕变后, ZChSnSb11-6

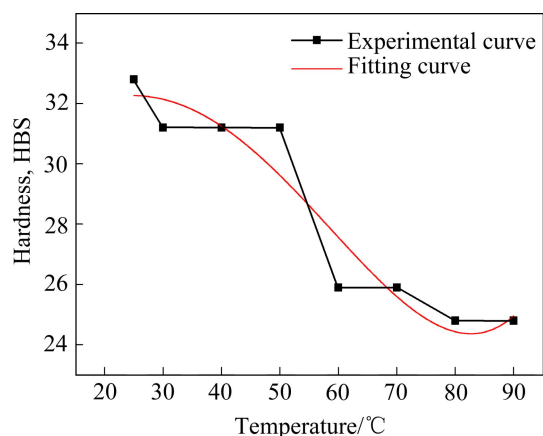


图7 ZChSnSb11-6 硬度随温度变化

Fig. 7 Change of hardness of ZChSnSb11-6 with temperature

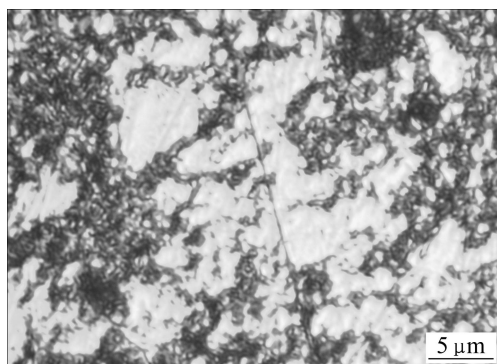


图8 试件6的显微组织

Fig. 8 Microstructure of sample 6

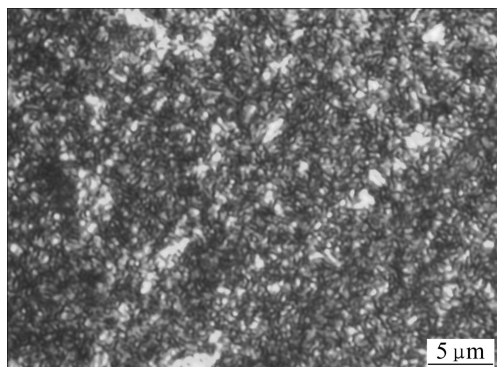


图9 试件4的显微组织

Fig. 9 Microstructure of sample 4

中 β 相和 ε 相的数量明显减少, 软相 α 固溶体增多。

SnSb 和 Cu_6Sn_5 不仅是硬质点, 还具有延展性, 使 ZChSnSb11-6 具备良好的塑性, 其布氏硬度分别约为 100HBS 和 370HBS。SnSb 和 Cu_6Sn_5 使合金基体组织产生畸变, 增加合金的变形抗力, 提高合金的强度; 它们分布在轴承表面形成显微凸起, 可以支撑轴

颈, 减小轴颈与轴承间的摩擦^[16]。综上可知, 实际工况下 ZChSnSb11-6 会发生蠕变, 且蠕变会使 SnSb 和 Cu_6Sn_5 减少, 从而导致合金的力学性能明显降低, 减磨性变差, 摩擦因数增大, 磨损加剧, 承载能力降低, 合金的使用寿命缩短^[17]。

图9所示为试件4的显微组织。由图9可知, 蠕变后 ZChSnSb11-6 的组织发生明显变化, 合金的再结晶温度范围为 50~60 °C, 蠕变实验温度已达到合金再结晶温度, 说明合金组织的变化由再结晶造成。图10所示为蠕变应变与应变率的关系。由图10可知, 蠕变过程中, 合金应变率随应变的增加而不断减小, 即应变硬化^[18]。因此, ZChSnSb11-6 蠕变机理如下: ZChSnSb11-6 在应力作用下产生塑性变形, 并发生应变硬化; 当温度超过合金再结晶温度时, 合金发生再结晶, 使原有变形回复, 回复后的合金在持续应力的作用下, 又产生塑性变形和应变硬化; 在温度作用下, 合金再次再结晶回复, 这样循环往复, 最后进入应变硬化与再结晶回复平衡状态, 经过长时间的积累, 合金产生不可恢复的塑性变形。

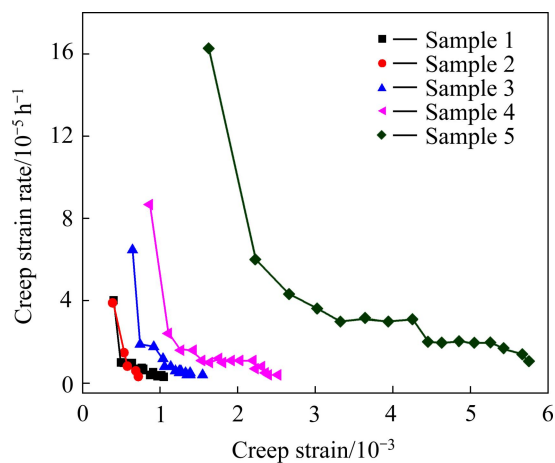


图10 蠕变应变与应变率关系

Fig. 10 Relationship between creep strain and strain rate

3 结论

1) 蠕变明显降低了 ZChSnSb11-6 的硬度、抗拉强度和屈服强度, 使合金的承载能力显著降低。其中, 合金抗拉强度的降低集中发生在蠕变第一阶段, 屈服强度的降低发生在蠕变第一、二阶段; 相比蠕变时间, 蠕变应力对合金的屈服强度影响较大。而且, 通过硬度实验确定了 ZChSnSb11-6 的蠕变临界温度(再结晶温度)范围为 50~60 °C。

2) 蠕变会降低 ZChSnSb11-6 的弹性模量, 即材料

的抗弹性变形能力降低、刚度变小、轴承的润滑性能变差。蠕变还会使合金塑性降低, 嵌藏性变差, 合金由塑性材料变为脆性材料。通过计算 ZChSnSb11-6 应变硬化指数可知, 蠕变降低了合金的抗塑性变形能力; 蠕变越明显, 抗塑性变形能力降低越显著, 合金发生破坏的可能性越大。

3) 蠕变导致 ZChSnSb11-6 显微组织发生变化, 合金中 β 相和 ϵ 相数量减少, 软相 α 固溶体数量增多, 合金硬度、强度和塑性等力学性能明显降低。在工作过程中, ZChSnSb11-6 的减磨性变差, 磨损加大, 使用寿命迅速缩短。

4) ZChSnSb11-6 蠕变机理如下: 在应力作用下, ZChSnSb11-6 产生塑性变形和应变硬化; 当工作温度超过其再结晶温度时, 合金发生再结晶使原有变形回复, 由于应力的持续作用, 合金又产生塑性变形和应变硬化; 在温度作用下, 合金再次再结晶回复, 经历了这样的交替作用后, 合金进入应变硬化与再结晶回复的平衡状态; 最终由于时间积累, 合金产生不可恢复的塑性变形, 即蠕变变形。

REFERENCES

- [1] WILSHIRE B, EVANS R W. Acquisition and analysis of creep data[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1994, 29: 159–165.
- [2] 沙桂英, 徐永波, 韩恩厚. 铸造 Mg-RE 合金的显微结构及其蠕变行为[J]. 材料研究学报, 2003, 17(6): 603–608.
SHA Gui-ying, XU Yong-bo, HAN En-hou. Microstructure and creep behavior of a cast Mg-RE alloy[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2003, 17(6): 603–608.
- [3] 湛利华, 李杰, 黄明辉, 李炎光. 2524 铝合金的蠕变时效行为[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(2): 320–326.
ZHAN Li-hua, LI Jie, HUANG Ming-hui, LI Yan-guang. Creep ageing behavior of 2524 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(2): 320–326.
- [4] 湛利华, 李炎光, 黄明辉. 应力作用下 2124 合金蠕变时效的组织与性能[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(3): 926–931.
ZHAN Li-hua, LI Yan-guang, HUANG Ming-hui. Microstructures and properties of 2124 alloy creep ageing under stress[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(3): 926–931.
- [5] PING D H, HONO K, NIE J F. Atom probe characterization of plate-like precipitates in a Mg-RE-Zn-Zr casting alloy[J]. Scripta Mater, 2003, 48: 1017–1022.
- [6] KOERNER R M, SOONG T Y, KOERNER G R, GONTAR A. Creep testing and data extrapolation of reinforced GCLs[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2001, 19: 413–425.
- [7] 田素贵, 王欣, 刘臣, 孙文儒. 热处理制度对 GH4169G 合金微观组织与蠕变性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(1): 108–115.
TIAN Su-gui, WANG Xin, LIU Chen, SUN Wen-ru. Influence of heat treatment regimes on microstructure and creep properties of GH4169G alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(1): 108–115.
- [8] CADEK J, SUSTEK V, PAHUTOWI M. An analysis of a set of creep data for a 9Cr-1Mo-0.2V steel[J]. Materials Science and Engineering, 1997, A225: 22–28.
- [9] GAFFARD V, BESSON J, GOURGUES A F. Creep failure model of a tempered martensitic stainless steel integrating multiple deformation and damage mechanisms[J]. International Journal of Fracture, 2005, 133: 139–166.
- [10] JELWAN J, CHOWDHURY M, PEARCE G. Design for creep: a critical examination of some methods[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 27: 350–372.
- [11] LASHIN A R, MOSSA M, EL-BEDIWI A, KAMAL M. Study of some physical properties of the rapidly solidified Sn-Sb-Cu-Zn alloys[J]. Materials and Design, 2013, 43: 322–326.
- [12] GB/T 2039—1997. 金属拉伸蠕变及持久试验方法[S].
GB/T 2039—1997. Tensile Creep and Lasting Testing Method of Metals [S].
- [13] 机械工业理化检验人员技术培训和资格鉴定委员会. 力学性能试验[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2003: 33–34.
Machine Industry Physical and Chemical Inspection Personnel Technical Training and Accreditation Committee. Mechanical properties test[M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2003: 33–34.
- [14] 张云, 曹富荣, 林开珍, 李宝绵, 周舸, 丁桦. GH4742 高温合金的动态再结晶行为[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(11): 3091–3099.
ZHANG Yun, CAO Fu-rong, LIN Kai-zhen, LI Bao-mian, ZHOU Ge, DING Hua. Dynamic recrystallization behavior of GH4742 superalloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(11): 3091–3099.
- [15] ALAM M Z, KAMAT S V, JAYARAM V, KARAMCHED P S, GHOSAL P, DAS D K. Dynamic recovery and recrystallization during high-temperature tensile deformation of a free-standing Pt-aluminide bond coat[J]. Materials Science and Engineering A, 2014, 604: 18–22.
- [16] SADYKOV F A, BARYKIN N P, VALEEV I S. Influence of temperature and strain rate on the mechanical properties of B83 Babbitt with different structures[J]. Strength of Materials, 2002, 34(2): 169–199.
- [17] WU Hai-rong, BI Qin-ling, ZHU Sheng-yu, YANG Jun, LIU Wei-min. Friction and wear properties of Babbitt alloy 16-16-2 under sea water environment[J]. Tribology International, 2011, 44: 1161–1167.
- [18] WANG S Q, LIU J H, CHEN D L. Effect of strain rate and temperature on strain hardening behavior of a dissimilar joint between Ti-6Al-4V and Ti17 alloys[J]. Materials and Design, 2014, 56: 174–184.

(编辑 龙怀中)