DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.10.006

SiC_p/2024Al 基复合材料蠕变时效幂律本构方程的建立

孙有平,胡一杰,陶德福,何江美,李旺珍
(广西科技大学 机械与交通工程学院,广西 柳州 545006)

摘　要:在时效温度 423~463 K、实验应力 150、175 和 200 MPa 的条件下,采用电子蠕变机对 SiC_p/2024Al 基复合材料蠕变时效行为进行研究。采用幂律本构方程,通过对实验数据的线性回归分析,建立 SiC_p/2024Al 基复合材料稳态蠕变速率与实验应力及时效温度之间的本构模型。研究表明,随着实验应力增大和时效温度的升高,SiC_p/2024Al 基复合材料的稳态蠕变速率增大,且蠕变曲线在第二阶段的持续时间缩短;根据本构模型计算得到的稳态蠕变速率的计算值与实验值基本吻合,表明该本构模型能准确的描述 SiC_p/2024Al 基复合材料蠕变时效行为。

关键词:SiC_p/2024Al;复合材料;蠕变时效;本构模型

中图分类号:TB331　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)10-1046-04

Establishment of Creep Aging Power Law Constitutive Equation of SiC_p/2024Al Composites

SUN Youping, HU Yijie, TAO Defu, HE Jiangmei, LI Wangzhen
(School of Mechanical and Transportation Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China)

Abstract: The creep aging behavior of SiC_p/2024Al composites was studied on the electronic creep machine at the temperature from 423 to 463 K and under the stress of 150, 175 and 200 MPa. The constitutive model of SiC_p/2024Al composites between steady state creep rate and experimental stress and aging temperature was established by power law constitutive equation and linear regression analysis of experimental data. The results show that the steady creep rate of SiC_p/2024Al composites increases with the increase of experimental stress and aging temperature, and the duration of creep curve in the second stage decreases. The calculated value of steady creep rate is basically consistent with the experimental value, which indicates that the constitutive model can accurately describe the creep aging behavior of SiC_p/2024Al composites.

Key words: SiC_p/2024Al; composites; creep aging; constitutive model

SiC_p/2024Al 基复合材料具有中高强度、高比刚度、较好的耐蚀性和耐磨性等优点,已被广泛应用于航空航天、电子元件等领域[1-3]。蠕变时效成形技术是利用金属的蠕变特性,将蠕变和时效热处理同步进行的一种成形方法[4,5]。在实现大型蒙皮和整体壁板成形方面,蠕变时效成形技术有着独特的优势[6,7]。所以,蠕变时效成形对提高高强度铝合金板材成形性方面起着重要作用,需要对其展开研究。

为了能把蠕变时效成形技术应用于工程实际当中,特别是航空航天工业中的整体结构部件中的应用,国内外针对蠕变时效本构关系已开展一些研究。王新建[8]通过对 2024T4 铝合金在 175 ℃下进行蠕变拉伸试验,并对试验数据进行分析处理,建立了相应的蠕变本构方程。邓运来[9]等通过对 Al-0.6Mg-0.4Si 铝合金进行蠕变拉伸试验,建立了稳态蠕变速率与时效温度和应力之间的本构模型。Li 等[10]通过对蠕变时效后析出相尺寸、形貌进行分析,提出了适合于 7804 铝合金的蠕变时效本构模型。李喜财[11]在不同的时效温度和实验应力条件下,建立了 2219 铝合金的蠕变时效本构模型。王文熙[12]对 Al-Mg-Si-Cu 合金进行了蠕变拉伸试验,建立了双曲正弦本构模型。可见,蠕变时效本构模型受多种因素的影响。

通过单向拉伸蠕变时效成形试验,研究 SiC_p/2024Al 基复合材料在不同实验应力和时效温

收稿日期:2019-06-24
基金项目:广西自然科学基金(2016GXNSFDA380008)、柳州市科学研究与技术开发计划(2017BD20301)、广西重点研发计划(桂科 AC16380032)、广西科技大学研究生教育创新计划(GKYC201601)资助项目
作者简介:孙有平(1979-),吉林松原人,教授.研究方向:金属材料先进成形理论研究.电话:13627723445,
E-mail:syptaiji@126.com

度下的蠕变时效行为，建立稳态蠕变速率与实验应力和时效温度之间的本构关系，为 SiCp/2024Al 基复合材料蠕变时效成形工艺的制定提供理论依据。

1　实验

所用材料为 SiCp/2024Al 复合材料热轧薄板，板材厚度为 2 mm，2024Al 合金化学成分如表 1，固溶工艺为 495 ℃/1 h，水淬；随后在 RDL50 电子蠕变试验机上进行蠕变实验。蠕变时效温度分别为 423、443 和 463 K，实验应力分别为 150、175、200 MPa。

表1 2024合金成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of 2024 aluminum alloy

Cu	Mg	Si	Mn	Fe	Al
4.42	0.42	0.71	0.65	0.083	余量

2　结果与讨论

2.1　蠕变时效行为

SiCp/2024Al 基复合材料在不同实验应力和时效温度下的蠕变曲线如图 1 所示。从图 1 可以看出，蠕变曲线都表现出明显的蠕变第一阶段(瞬时蠕变阶段)和蠕变第二阶段(稳态蠕变阶段)。蠕变应变随着时效时间的增大，迅速增大后稳定，呈现稳态蠕变特征。图 1(a)，实验应力在 150、175、200 MPa 下的蠕变变形量分别为 1.42%、1.97%、2.33%。在高温下受到外力作用，金属材料内部会立即产生变形。这种变形是以金属内部位错的增殖和移动、晶粒的相互滑移等基本现象为基础的。尹旭妮[13]等人研究认为外力作用使材料内部产生大量的位错，导致新的位错源开动，蠕变持续进行，因此在相同温度下，实验应力越大，合金的蠕变行为越明显，蠕变应变越大。图 1(a)、(b)和(c)中，在实验应力 150 MPa 下的蠕变变形量为 1.42%、1.73%、1.9%。说明在恒定应力下，时效温度越高，蠕变变形量越大。

对图 1 中稳态蠕变曲线进行线性拟合，得到不同蠕变条件下的稳态蠕变速率，如图 2 所示。可以看出，SiCp/2024Al 基复合材料的稳态蠕变速率随着实验应力增大和温度的升高呈增大趋势。当时效温度为 423 K 时，实验应力由 150 MPa 升到 200 MPa 后，稳态蠕变速率由 3.681×10^{-6} s^{-1} 增大到 1.496×10^{-5} s^{-1}。当实验应力为 200 MPa 时，时效温度由 423 K 升到 463 K 后，稳态蠕变速率由 5.886×10^{-6} s^{-1} 增大到 5.101×10^{-5} s^{-1}。当时效温度较低时，合金内位错滑移的较少，随着时效温度的升高，受激活能的影响，合金内位错滑移增多，导致合金变形速度加快[14]。同时降低了合金蠕变抗力，使得蠕变变形速率增大[15]。

2.2　本构方程的建立

通常情况下，采用稳态蠕变速率 ε(即最小蠕变速率)来描述金属材料的蠕变特性。稳态蠕变速率主要受到金属材料的固有特性、蠕变温度 T 和外加的蠕变应力 σ 等因素的影响。材料的稳态蠕变速率 ε 和蠕变的温度 T 以及蠕变的外加应力 σ 存在的关系如下：

$$\varepsilon=A\sigma^{n}\exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \tag{1}$$

式中，A 为材料常数；σ 为实验应力，MPa；n 为实验应力指数；Q 为材料的表现激活能，J/mol；R 为通用气体常数，8.31 J/mol；T 为蠕变时效的温度，K。

对每个稳态蠕变速率和与之相对应的应力值，同时求对数后，通过线性回归分析，可得到不同温度下的关系曲线 $\ln\dot{\varepsilon}$-$\ln\sigma$，直线的斜率就是在该温度下的表观应力指数，即

$$n=\frac{\ln\dot{\varepsilon}}{\ln\sigma} \tag{2}$$

如图 3 所示，SiCp/2024Al 基复合材料在 150、160 和 170 ℃条件下的应力指数分别为：1.650、3.174 和 4.218。因此，SiCp/2024Al 基复合材料的平均应力指数为 3.014。

实验应力恒定时，$\ln\dot{\varepsilon}$ 与 $1/T$ 呈线性关系，蠕变表观激活能表示在一定应力下，稳态蠕变速率随温度的变化情况，通过线性回归分析得到不同应力下

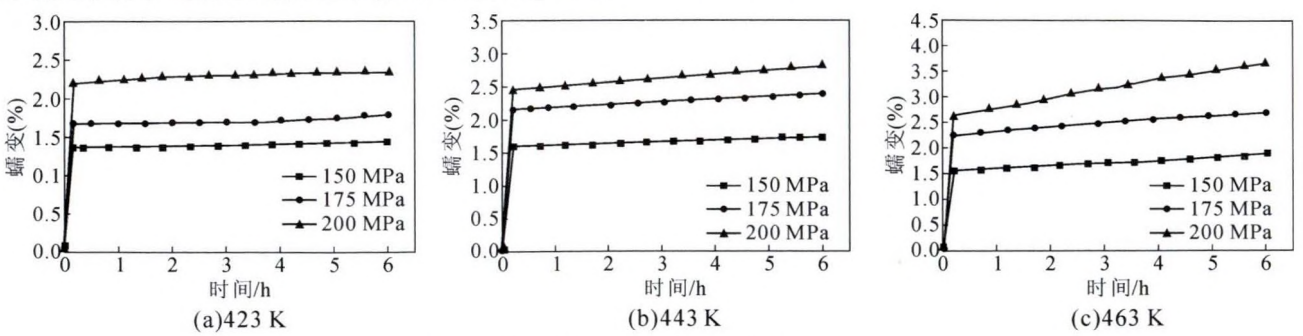

图 1 不同实验应力和时效温度下的蠕变曲线
Fig.1 Creep aging curves of SiCp/2024Al composites at different temperatures

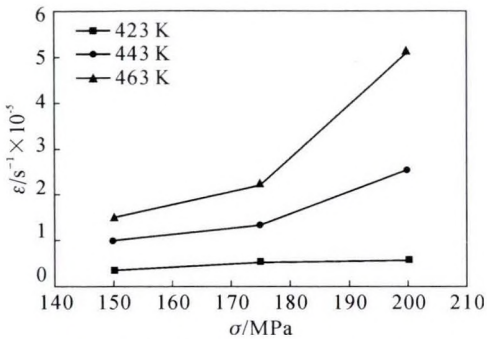

图 2 不同参数下的稳态蠕变速率
Fig.2 Creep rate under different parameters

$\ln\dot{\varepsilon}$与 $1/T$ 的关系曲线，如图 3。根据计算公式：

$$Q \approx -R\left[\frac{\ln\dot{\varepsilon}}{1/T}\right] \tag{3}$$

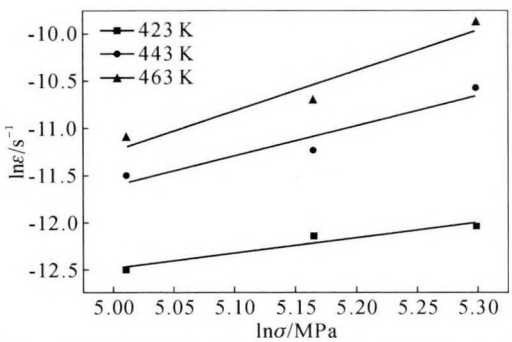

图 3 不同温度下实验应力和稳态蠕变速率的关系
Fig.3 Relationship between experimental stress and steady creep rate at different temperatures

求得相应的应力作用下的表现激活能。在 150、175 和 200 MPa 的应力作用下的表现激活能 Q 分别为 57.406、58.405 和 88.276 kJ/mol。因此，SiCp/2024Al 基复合材料的平均表现激活能为 68.029 kJ/mol。

表观应力指数 n 为 3.014，为位错滑移控制机制。纯铝的激活能能为(145 kJ/mol)，实验求得的表观激活能(57.406~88.276 kJ/mol)远低于纯铝的激活能；这说明 SiCp/2024Al 基复合材料在设定的工艺参数下的蠕变行为符合幂律本构模型，其主导的蠕变机制为位错滑移机制[16]。

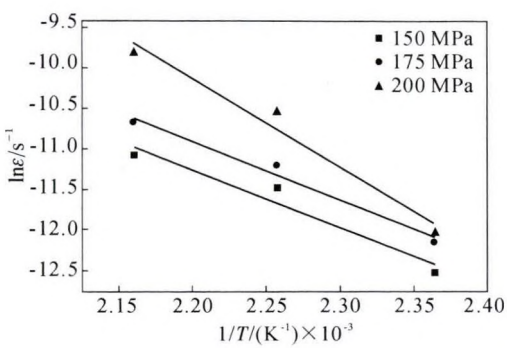

图 4 不同应力下时效温度与稳态蠕变速率的关系
Fig.4 Relationship between aging temperature and steady creep rate under different stress

由图 4，得到截距 Z(Z 分别为 3.91、4.52、13.18)。根据公式

$$\ln A + n\ln\sigma = Z \tag{4}$$

式中，A 为所求材料参数，n 为蠕变表现应力指数，σ 为蠕变时所施加的应力值，MPa。

求得材料常数的平均值为：$A=2.534\times10^{-4}$。

将各参数带入式(1)可得到 SiCp/2024Al 基复合材料蠕变的本构方程如下：

$$\varepsilon = 2.534\times10^{-4}\times\sigma^{3.014}\times\exp\left(\frac{68\,029}{RT}\right) \tag{5}$$

2.3 计算值和实验值的误差分析

为了验证 SiCp/2024Al 基复合材料稳态蠕变速率本构方程的正确性，把各时效温度和试验应力代入式(5)中，然后将计算值与试验值进行比较，如图 5 所示。可以看出通过幂律本构蠕变模型计算得到的最小蠕变速率值与实验得出的最小蠕变速率值能较好的吻合。因此，建立的幂律本构模型可以较好的预测 SiCp/2024Al 基复合材料在时效温度(423、443 和 463 K)和蠕变应力(150、175 和 200 MPa)条件下的最小蠕变速率。

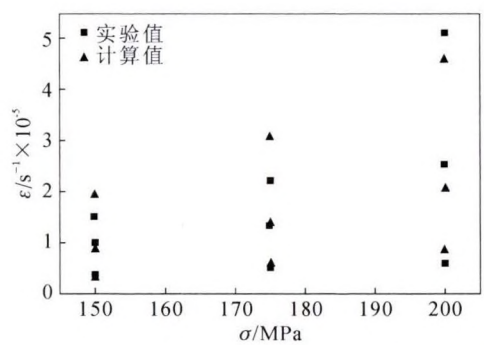

图 5 实验应力和稳态蠕变速率的试验值和计算值
Fig.5 Experimental vales and predictive values of experimental stress and steady creep rate

3 结论

(1)SiCp/2024Al 基复合材料在 423~463 K 均呈现典型的蠕变特点，先减速后进入长时稳态阶段。随着时效温度和实验应力的增大，合金的蠕变行为增强，蠕变速率和蠕变应变量呈增大趋势。

(2)确定了 SiCp/2024Al 基复合材料的平均蠕变应力指数为 3.014，平均激活能为 68.029 kJ/mol，其蠕变机制为位错滑移制约机制。

(3)通过蠕变拉伸试验得出的蠕变应变与时效温度和时效应力的曲线关系，并以最小蠕变速率为基础建立了 SiCp/2024Al 基复合材料的蠕变时效本构方程。

参考文献：

[1] 王金辉，金培鹏，张瑞，等. SiCp/Al 复合材料高温蠕变行为[J]. 材料热处理学报，2017，38(1): 14-18.

[2] 张国庆，原梅妮，侯红亮，等. 数值模拟研究 SiCp/2024Al 复合材料动态力学性能[J]. 塑性工程学报，2016，23(4): 112-118.

[3] 刘一雄，郑振兴，朱德智，等. 热处理对 SiCp/7075Al 复合材料组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报，2018，39(9): 1-6.

[4] Holman M C. Autoclave age forming large aluminum aircraft panels [J]. Journal of Mechanical Working Technology, 1989, 20: 477-488.

[5] Ho K C, Lin J, Dean T A. Modelling of springback in creep forming thick aluminum sheets [J]. Internationa Journal of Plasticity, 2004, 20(4): 733-751.

[6] Zeng Y S, Huang X. Forming technologies of large integral panel [J]. ACTA Aeronaut. Astronaut. Sinica, 2008, 29: 721-727.

[7] Zhan L, Li Y, Huang M, et al. Constitutive equation describing creep ageing of 2124 aluminum alloy [J]. J. South China Univ. Technol, 2012(4): 107-111.

[8] 王新建. 2024T4 铝合金蠕变本构关系研究[J]. 航空精密制造技术, 2017, 53(3): 26-29, 20.

[9] 邓运来，张书，王宇，等. Al-0.6Mg-0.4Si 铝合金的蠕变变形行为及稳态蠕变本构模型的建立[J]. 热加工工艺，2018，47(10): 1-6.

[10] Ho K C, Lin J, Dean T A. Constitutive modelling of primary creep for age forming an aluminum alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 153-154(1): 122-127.

[11] 李喜财，湛利华. 基于蠕变时效交互作用机理的 2219 铝合金统一本构建模 [J]. 中南大学学报（自然科学版），2017，48(11): 2942-2948.

[12] 王文熙. 高性能铝合金蠕变时效成形形变行为及本构关系研究[D]. 柳州：广西科技大学，2018.

[13] 尹旭妮，湛利华，赵俊. 2219 铝合金稳态蠕变本构方程的建立[J]. 中国有色金属学报，2014(9): 2250-2256.

[14] Li Yanguang. Experimental study on creep aging behavior and constitutive modeling of 2124 aluminum alloy [D]. Central south university, 2012.

[15] Chen Y, Yi D, Pan S, et al. Effect of temperature on creep behavior of 2024 aluminum alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(4): 632-639.

[16] Zhan L H, Li J, Huang M H. Creep ageing behavior and constitutive equation of 2524 aluminum alloy [J]. Jixie Gongcheng Cailiao (Materials for Mechanical Engineering), 2013, 37 (5): 92-96.

（上接第 1045 页）

[2] 巩瑞浩. 大型球磨机用高铬钢力学性能和耐磨耐蚀性研究 [D]. 济南：山东大学. 2017.

[3] Huang X, W u Y. A High Cr-M o Alloy Iron[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 1998, 7 (4) : 463- 466.

[4] Singh K K, Verm a R S, Murty G M D. Optimizing Wear Resistance and Impact Toughness in High Chromium Iron Mo-Ni Alloy [J] . Journal of Materials Engineering and Performance, 2009,18 (4) : 438-440.

[5] Yen S K, Shih H C. Investigation in to Hydrogen Embrittlement of High-Chromium Stainless Steel by Cathodic Charging [J] .Corrosion Prevention and Control, 1996, 42(6) : 137-144.

[6] 陈茂林，宋延沛，徐林，等. RE 复合变质处理对高碳高铬钢组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金：2014, 34 (7): 700-702.

[7] 崔国明，李兴霞，翟德梅. 热处理对新型高碳高铬钢组织和力学性能的影响[J]. 铸造技术：2013, 34(6): 698-699.

[8] 涂小慧. 钢铁材料在热强碱铝矿浆中的冲击腐蚀磨损的研究[D]. 西安：西安交通大学. 2004.

[9] 赵四勇，林怀涛，曾耀东，等. 筒式球磨机磨球与衬板材质配副性研究[J]. 水利电力机械, 1993, 15(6): 51-55.

[10] Zhao S Y, Lin H T, Zeng Y D et al. The Optimal Mating of Balls and Lining Plates in Ball Mills [J]. Wear, 1994, 178: 79-84.

[11] 李卫. 球磨机磨球与衬板的选材及其匹配系统的试验研究 // 中国金属学会耐磨材料学术委员会全国磨球与衬板学术会议[C], 北京：中国金属学会耐磨材料学术委员会，1995.

[12] 孙珍宝，朱谱藩，林慧国. 合金钢手册(上册) [M]. 北京：冶金工业出版社, 1984.

技术资料邮购

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

本书由西安理工大学魏兵教授编著。共8章：1、铸铁件均衡凝固与有限补缩；2、铸铁件冒口补缩设计及应用；3、压边浇冒口系统；4、浇注系统大孔出流理论与设计；5、铸件均衡凝固工艺；6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺；7、浇注系统当冒口补缩设计方法；8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书320页。

特快专递邮购价：226元。

邮购咨询：李巧凤　　电话/传真：029-83222071　　技术咨询：13609155628