

# 2219 铝合金单轴拉/压蠕变时效行性行为研究

尹旭妮 周理 刘玉振 范彬 熊志宏

(湖南城市学院机械与电气工程学院, 益阳 413000)

**文 摘** 为研究 2219 铝合金在蠕变时效成形过程中,不同应力状态(拉/压)对其蠕变行为的影响规律,采用室温拉伸的方法研究了 165~185℃内单轴拉/压 2219 铝合金力学性能的变化。结果表明:最佳蠕变时效时间为 11 h;在相同的时效制度下,拉/压应力蠕变变形量均随着温度的升高而增加,拉应力的蠕变变形量始终大于压应力的蠕变变形量;无论是拉/压应力蠕变时效还是无应力常规时效,其时效后的性能均随着温度的升高而降低,然而,拉应力时效后性能的下降低幅度最为明显;最后,在时效温度为 165℃时,不同应力状态下的各项性能指标均表现为最佳。

**关键词** 铝合金,拉伸蠕变时效,压缩蠕变时效,力学性能

中图分类号: TG146.2

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2021.06.005

## Uniaxial Tension/Compression Creep Behavior of 2219 Aluminum Alloy

YIN Xuni ZHOU Li LIU Yuzhen FAN Bin XIONG Zhihong

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan City University, Yiyang, Hunan 413000)

**Abstract** Effect of stress states (tension/ /compression) on creep aging behavior in the process of creep aging forming of 2219 aluminum alloy was studied. The mechanical properties of 2219 aluminum alloy under uniaxial tension/compression were investigated when ageing at 165 to 185℃ by room temperature tensile test. The results show that the optimal creep aging time is 11h. Under the same aging regime, the creep deformation of tensile stress and compressive stress increases with the increase of temperature, and the creep deformation of tensile stress is always greater than that of compressive stress. Regardless of the creep aging under tensile/compressive stress or the conventional aging without stress, the aging properties decrease with the increase of temperature. However, the decrease of properties is most obvious after tensile stress aging. Finally, when the aging temperature is 165℃, all the performance indexes are the best under different stress states.

**Key words** Aluminum alloy, Tensile creep aging, Compression creep aging, Mechanical property

### 0 引言

2219 铝合金是一种耐高温、焊接性能优良、高温力学性能稳定、抗应力腐蚀强、可热处理强化的 Al-Cu 系铝合金,在贮箱结构材料选用已完全取代 2014 铝合金<sup>[1-2]</sup>。目前,2219 铝合金在储藏液氮液氧的贮箱、飞行器壳体、飞机蒙皮壁板等部件上有着广泛的应用<sup>[3]</sup>。2219 铝合金的长达几十米的蒙皮和整体壁板成型成为了难题,为此,蠕变时效成型技术应运而生,蠕变时效成型技术成功实现了材料蠕变与时效热处理的同步进行<sup>[4-5]</sup>。蠕变时效成型技术过程可分为 3 个阶段<sup>[6-7]</sup>:(1)加载阶段,首先将待成形铝合金试件放置于根据构件形状尺寸设计好的模具上,将试件与模具型面封装、抽真空,使试件和模具型面紧密贴合;(2)时效阶段,将试件推入热压罐,加热到目标温度,当热压罐内保证一定的真空度,试件表面的温度维持恒定,试件发生弯曲等弹性变形与模具成形面完全贴合,使试件与模具贴合一段时间,这期间试件材料受到了蠕变、时效和应力松弛等多

种机制的共同影响,材料内部微观组织结构和各力学性能均会发生显著变化;(3)卸载阶段,时效结束后,卸除施加的载荷,试件发生自由回弹并冷却到室温,其时效成形工艺流程如图 1 所示。

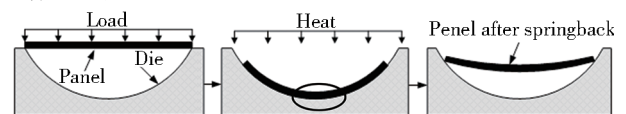


图 1 蠕变时效成形技术工艺流程

Fig. 1 Creep aging forming process

有大量的学者基于 2 系铝合金的时效时间、时效温度、预变形的引入对蠕变时效过程 3 个阶段开展了相关机理研究,但这些研究大部分都是基于单轴拉应力条件下的蠕变时效行为<sup>[8-10]</sup>。而蠕变时效成形第二阶段时效阶段红色区域位置的拉压受力,构件蠕变时效成型时由于壁板弯曲,壁板凸面受拉应力作用,凹面受压应力作用,中间某截面处会处于无应力状态。因此,同时研究 2219 铝合金的单轴拉伸/压

收稿日期:2020-08-04

基金项目:湖南省教育厅科学研究项目(20C0361);湖南城市学院研究项目(湘城院[2020]15 号 25);湖南省自然科学基金(2018JJ2021)

第一作者简介:尹旭妮,1989 年出生,硕士研究生,主要从事高性能铝合金时效成形方面的研究工作。E-mail:yinxuni@163.com

缩应力下的蠕变行为及力学性能变化特点,本文能为2219铝合金在工程应用上如大型构件蠕变时效成形的工艺制定提供理论依据。

## 1 实验材料与方案

依据珠海某公司生产的高温蠕变实验机的产品规格,按照GB/T 2039—1997<sup>[11]</sup>设计标准拉伸蠕变试样与压缩蠕变试样,拉伸蠕变实验前期做了大量的研究<sup>[8,12]</sup>,设计的压缩蠕变试样尺寸见图2。压缩蠕变试样在自行设计的压缩蠕变实验工装的反向器上装夹实验,反向器的设计成功的将拉应力转化成压应力。保证了在同一台试验机上进行拉压蠕变时效不同应力状态或时效温度下的蠕变时效实验的可比性。

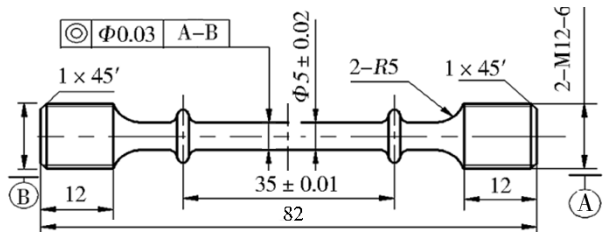


图2 压缩蠕变试样尺寸示意图

Fig. 2 Schematic diagram of compressive creep specimen size

为研究合金在拉应力或压应力蠕变时效行为及性能特点,在蠕变实验前需要对试样进行去毛刺、打磨、固溶强化及淬火处理<sup>[8,13]</sup>。2219铝合金的最佳固溶温度535℃,厚度为2 mm的试样保温36 min。用电位差计控制固溶炉温度,误差控制在±3℃以内,后采用室温水淬,淬火转移时间不超过35 s,蠕变试验机上设定其为5℃/min,当其逼近设置目标温度时,温度有所波动,并保温10 min。待保温时段结束后,加载装置自动加载到目标应力直至应力保持不变。实验选用2219铝合金热轧超厚板材,化学成分见表1。

表1 2219铝合金的主要化学成分表

Tab. 1 Main chemical compositions of 2219 aluminum alloy

2219 aluminum alloy									wt%
Cu	Mn	Zr	Fe	Ti	Si	Ni	Mg	Al	
5.24	0.27	0.14	0.13	0.065	0.042	0.03	0.028	Bal.	

## 2 结果分析

### 2.1 时效工艺参数的确定

为使2219铝合金成形性效果达到最佳,需要研究不同时效时间以及应力水平对其力学性能的影响。初步选定时效时间为1~13 h,时效应力为0~180 MPa。因硬度的测量对合金的尺寸没要求,小样可进行测试,取材较方便,此次研究通过时效硬化曲线直观表示合金是否具有时效硬化现象,再依据硬化曲线确定时效的实验参数。经过时效处理合金目标屈服与抗拉强度分别达350和440 MPa。参照此目标,并依据前期研究结果,开展2219铝合金在蠕变温度165℃下的不同时效时间的屈服强度测量实验,其测量结果见图3。可见,不同蠕变时效时间处理后合金的屈服强度随时间的变化趋势呈类“抛物线”型。根据曲线初步确定实验方案的最佳时效时间,虽然高

应力条件下180 MPa/11 h时屈服强度已呈现下降趋势,但是考虑到构件时效成形过程中蠕变时效基本上是在低应力条件下进行的,最终,确定经预处理后的2219蠕变时效试样的最佳蠕变时效时间为11 h。

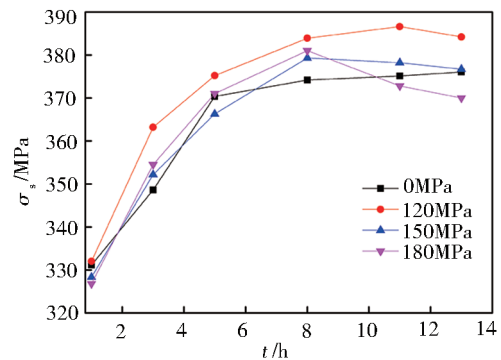


图3 不同应力水平下屈服强度变化曲线

Fig. 3 Yield strength curves under different stress levels

当蠕变应力为120 MPa、时效时间为11 h时,2219铝合金的屈服强度达到峰值为386.6 MPa,而且该应力条件下的任何时刻的屈服强度要明显高于其他应力时效处理后合金的。该时效温度下的材料峰值屈服强度已经远远高于目标屈服强度350 MPa。

### 2.2 蠕变时效行为

前期经过大量反复的实验探索,综合考虑蠕变时效的实验效率与时效后的材料的力学性能最终确定155~185℃范围的蠕变时效温度更为理想。然而,时效温度为155℃力学性能达峰时时效时间太长且其峰值屈服强度仍低于380 MPa。而在时效温度185℃,应力180 MPa的条件下合金稳态蠕变速率变化幅度过大;另外该工艺条件下拉应力蠕变时效过程的蠕变机制已发生改变。综合考虑,最终取165、175℃两组温度对拉应力与压应力蠕变时效进行对比。

图4为预处理态2219铝合金在165、175℃二种恒定温度下,时效时间11 h内的蠕变曲线。每一组曲线都是3种不同应力值对应的拉和压应力状态的蠕变应变的结果。可以看出,当时效温度相同时,无论试样的应力状态如何,随着时效应力的增加,合金的蠕变变形量显著增加,而蠕变变形量的增加主要表现在各蠕变曲线的蠕变第一阶段。此外,当时效温度、应力大小均相同时,拉应力状态下的蠕变变形量大于压应力状态下的蠕变变形量,而且随着时效应力的增大,二者之间的变形量相差的越来越大。比如在时效温度165℃,应力为120 MPa时,压、拉应力状态下的蠕变总变形量分别为0.211%和0.343%,拉应力比压应力的蠕变总变形量增加了62.6%;应力为180 MPa时,压、拉应力状态下的蠕变总变形量分别为0.542%和0.719%,后者较前者增加了33%。在大型壁板蠕变时效成型时,壁板需求受拉的变形量需要大于受压的变形量,当前几组工艺实验条件下,基本满足这一要求。无论试样的应力状态如何,蠕变的温度、时间、应力大小是影响蠕变时效的3个重要因素。

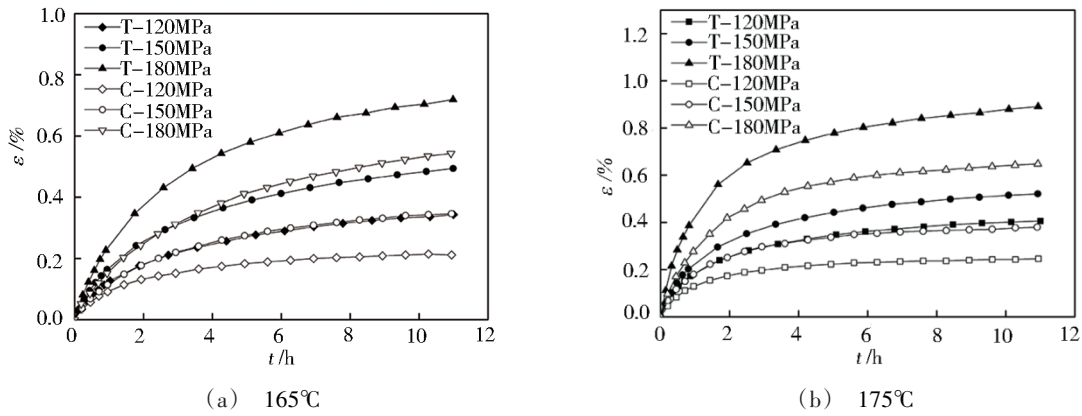


图4 不同应力下拉和压应力的蠕变时效曲线  
Fig. 4 Creep aging curves under different tensile and compressive stresses

## 2.3 力学性能

### 2.3.1 时效温度对合金力学性能的影响

图5为2219铝合金在不同时效温度常规时效和拉压蠕变时效11h后的拉伸力学性能。在120 MPa时效应力作用下,拉或压蠕变时效后的力学性能随着温度的升高而降低,常规时效11h的力学性能也随着温度的升高而降低。拉伸较压缩的蠕变时效后

的性能对温度的变化更为敏感,随着温度的升高,其性能下降的幅度较大。在蠕变时效温度由165°C升至185°C时,其屈服强度由386.6 MPa降至337.1 MPa,抗拉强度由468.6 MPa降至433 MPa。压应力蠕变时效和常规时效后的性能由于温度的升高,下降幅度稍小。这是由于拉应力状态下蠕变时效对温度的敏感性更高,温度增加至185°C已经进入过时效阶段<sup>[14]</sup>。

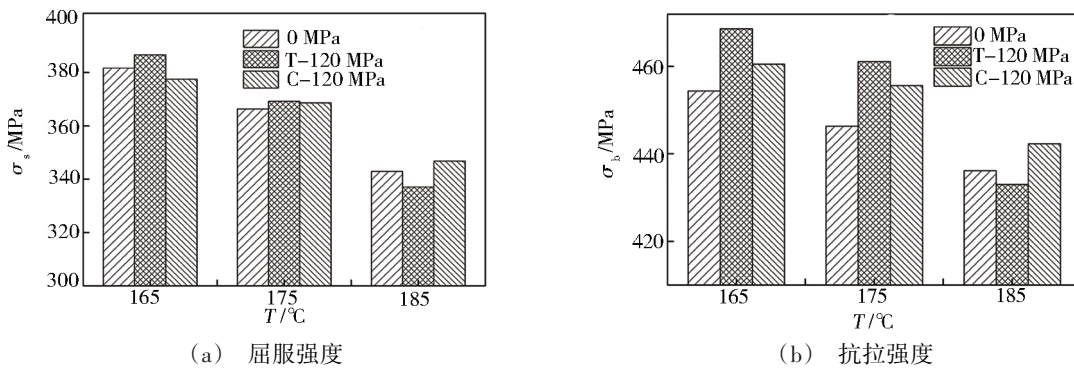


图5 不同温度条件下,拉压不同应力状态的力学性能对比

Fig. 5 Comparison of mechanical properties of different stress states and temperature

由图5可知,在165~185°C时,引入应力(拉/压)的蠕变时效后的抗拉强度基本上大于常规时效后的,而构件时效成形是拉应力、压应力以及中间层的无应力状态同时存在,综合考虑成形过程中的应力状态,为保证成形件后的性能达到最佳状态,选165°C的蠕变时效温度,合金的强化效果最好。

### 2.3.2 应力大小对合金力学性能的影响

图6为拉/压不同应力下,不同蠕变应力对时效后试样的力学性能的影响。可见,随着蠕变实验应力的增加,拉伸蠕变时效后试样的屈服强度呈现下降趋势。而压缩蠕变时效后试样的屈服强度呈现先增加后降低的变化趋势。当应力从120 MPa增到

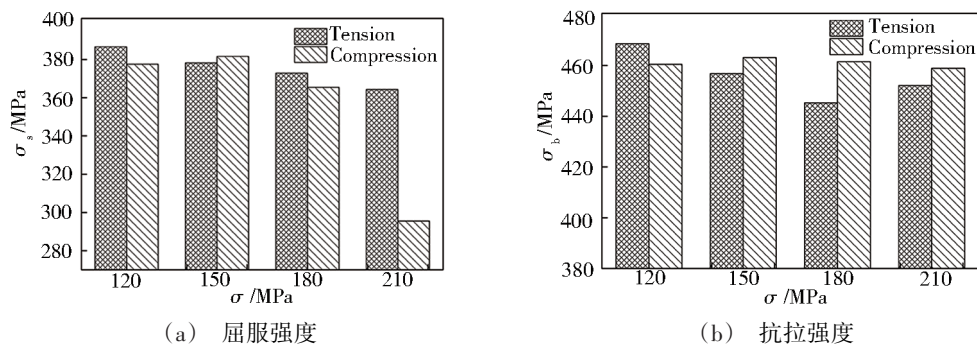


图6 不同应力水平下,拉/压不同应力状态的力学性能对比

Fig. 6 Comparison of mechanical properties of different stress states under different stress



150 MPa, 拉应力蠕变时效后的屈服强度由 386.6 MPa 降到 378.2 MPa。压应力蠕变时效后的屈服强度由 377.5 MPa 升高到 381.6 MPa。拉应力时效后的力学性能在实验应力 120 MPa 达到最大值, 而压应力时效后的力学性能在应力 150 MPa 达到最大值。在较高压应力水平时(如应力为 210 MPa)其蠕变时效后的屈服强度显著下降, 这是时效成形过程必须考虑的关键因素。但是大型壁板在时效成形过程中, 蠕变时效成形基本上在低应力水平下进行, 所在在某种程度上能避免此现象的发生。同时, 拉应力蠕变时效后的抗拉强度呈现先降低后升高的变化趋势, 而压应力蠕变时效后的抗拉强度变化不大。

### 3 结论

(1) 蠕变时效温度为 165℃ 时, 在 4 个应力水平的时效硬化曲线得出在低应力条件下( $\sigma \leq 120$  MPa)最佳蠕变时间为 11 h, 而较高应力(150~180 MPa)条件下最佳蠕变时间缩短至 8 h。综合考虑构件的成形条件, 确定 2219 铝合金最佳蠕变时效时间为 11 h。

(2) 在相同的蠕变时效制度下, 单轴拉伸应力的蠕变变形量大于单轴压缩应力的蠕变变形量。在应力大小为 120 和 180 MPa 时, 拉应力较压应力的蠕变总变形量分别增加 62.6% 和 33%。

(3) 单轴拉伸/压缩应力蠕变时效和无应力常规时效, 拉/压应力蠕变时效和常规时效, 其时效后的性能均随着温度的升高而降低, 其中拉应力下降幅度最为明显约为 12.8%。综合考虑不同应力状态下材料的力学性能, 确定最佳时效温度为 165℃。

### 参考文献

[1] 黄自德. 显微组织对 2219 铝合金蠕变裂纹扩展行为的影响[D]. 大连理工大学, 2017.

HUANG Zide. Effect of microstructure on creep crack growth behavior of 2219 aluminum alloy [D]. Dalian University of Technology, 2017.

[2] 马征. 冷变形及时效对 2219 铝合金组织性能的影响规律[D]. 哈尔滨工业大学, 2014.

MA Zheng. Influence of cold deformation and aging on microstructure and properties of aluminum alloy 2219 [D]. Harbin Institute of Technology, 2014.

[3] 丁吉坤. 不同热处理状态下的 2219 铝合金变极性 TIG 焊焊接接头性能研究[D]. 天津大学, 2014.

DING Jikun. Research on the effect of different heat treatment on variable polarity TIG welded 2219 aluminum alloy joints properties [D]. TianJin university, 2014

[4] 曾元松, 黄遐, 黄硕. 蠕变时效成形技术研究现状与发展趋势[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(3): 1-8.

ZENG Yuansong, HUANG Xia, HUANG Shuo. The research situation and the developing tendency of creep age forming technology[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(3): 1-8.

[5] 王娜娜, 周吉学, 赵东清, 等. 固溶处理对 Mg-Gd-Y-Zn 合金微观组织及硬度的影响[J]. 西安工业大学学报, 2020, 40(3): 282-289.

WANG Nana, ZHOU Jixue, ZHAO Dongqing, et al. Effect of solid-solution on microstructure and hardness of Mg-Gd-Y-Zn alloys [J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2020, 40(3): 282-289.

[6] 湛利华, 许晓龙, 贾树峰, 等. 7055 铝合金加筋板蠕变时效成形有限元仿真[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(8): 2104-2109.

ZHAN Lihua, XU Xiaolong, JIA Shufeng, et al. Finite element simulation for creep age forming of 7055 aluminum alloy stiffened panel [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(8): 2104-2109.

[7] 郑英, 吴阳, 张劲, 等. 7475 铝合金网格筋条壁板蠕变成形的试验和数值模拟[J]. 锻压技术, 2012, 37(5): 42-46.

ZHENG Ying, WU Yang, ZHANG Jin. Experiment and numerical simulation of creep forming for 7475 aluminum alloy integrally stiffened panel [J]. Forging & Stamping Technology, 2012, 37(5): 42-46.

[8] 尹旭妮, 刘欲振, 殷超, 等. 预处理对 2219 铝合金蠕变行为及力学性能的影响[J]. 宇航材料工艺, 2020, 50(2): 44-47.

YIN Xuni, LIU Yuzhen, YIN Jiu, et al. Effect of pretreatment on creep behavior and mechanical properties of 2219 aluminum alloy [J]. Aerospace materials technology, 2020, 50(2): 44-47.

[9] 孙找, 湛利华, 刘健, 等. 2219 铝合金蠕变时效成形过程中的断裂行为[J]. 塑性工程学报, 2018, 25(5): 284-290.

SUN Zhao, ZHAN Lihua, LIU Jian, et al. Fracture behavior in creep aging forming process of aluminum alloy 2219 [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25(5): 284-290.

[10] 李壮, 付雪松, 常志龙, 等. 2219T87 铝合金焊接接头的常温蠕变行为及其预测[J]. 中国有色金属学报. 2014(09): 2235-2242.

LI Zhuang, FU Xuesong, CHANG Zhilong, et al. Creep behavior and forecast of welded joint for 2219T87 aluminum alloy at room temperature [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals. 2014(09): 2235-2242.

[11] 李久林, 梁新邦. GB/T2039—1997 金属拉伸蠕变及持久试验方法国家标准编制说明[S].

LI Jiulin, LIANG Xinbang. The description for drawing up national standards for GB/T2039—1997 tensile creep and test methods for durability of metals [S].

[12] 刘凌峰, 湛利华, 李文科. 升温速率对 2219 铝合金蠕变时效行为的影响[J]. 材料工程, 2018, 46(3): 117-123.

LIU Lingfeng, ZHAN Lihua, LI Wenke. Effect of heating rate on creep aging behavior of 2219 aluminum alloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(3): 117-123.

[13] 夏雨驰. 2024 铝合金的蠕变时效特性研究[D]. 中南大学, 2012.

XIA Yuchi. Study on creep aging characteristics of 2024 aluminum alloy [D]. Central South University, 2012.

[14] 贾树峰. 2219 铝合金电脉冲作用下的应力时效行为研究[D]. 中南大学, 2014.

JIA Shufeng. Study on stress aging behavior under the effect of electrical pulses of 2219 aluminum alloy [D]. Central South University, 2012.