预处理对2219铝合金蠕变行为及力学性能的影响

尹旭妮　刘欲振　殷　赳　陈　昶
（湖南城市学院机械与电气工程学院，益阳　413000）

文　摘　为了研究不同预变形量对铝合金蠕变行为及力学性能的影响规律。以2219铝合金为研究对象，在温度为175 ℃，180 MPa应力条件下，研究0~8%的预变形量对2219铝合金蠕变行为及力学性能的影响。结果表明：预变形处理的引入，材料的蠕变变形量和力学性能大幅度增加。当预变形处理量为1%时，其蠕变变形量较未处理时试样蠕变变形量增加了118%。而随着预变形量的继续增加，试样的的力学性能呈现快速下降的变化趋势。综合考虑蠕变变形量与力学性能时，最利于构件的蠕变时效成形的2219铝合金的预变形处理量为3%。

关键词　2219铝合金，预变形，蠕变时效
中图分类号：TG146.2　　DOI：10.12044/j.issn.1007-2330.2020.02.008

Effect of Pretreatment on Creep Behavior and Mechanical Properties of 2219 Aluminum Alloy

YIN Xuni　LIU Yuzhen　YIN Jiu　CHEN Chang
（College of Mechanical and Electrical Engineering，Hunan City University，Yiyang　413000）

Abstract　In order to study the effects of different pre-deformation on creep behavior and mechanical properties of aluminum alloy，the 2219 aluminum alloy was taken as example. Under condition of 175 ℃ and 180 MPa，creep behavior and mechanical properties of 2219 aluminum alloys with 0 to 8% pre-deformation after creep aging were investigated. The results show that the creep deformation and mechanical properties of materials increase greatly with the introduction of pre-deformation treatment. When the pre-deformation treatment is 1%，the creep deformation of the sample increases by 118% compared with that of the untreated sample. However，as the amount of pre-deformation continues to increase，the mechanical properties of the sample decline rapidly. With comprehensive consideration of creep deformation and the mechanical property，the most favorable pre-stretching for creep aging forming of components is 3%.

Key words　2219 aluminium alloy，Predeformation，Creep aging

0　引言

铝合金2219具有很高的室温力学性能及优良的高温与超低温性能，目前已广泛应用于航天器、飞机蒙皮等航空航天领域[1-2]。近年来关于二系铝合金的蠕变时效温度、应力、时间等各影响因素及蠕变时效机理均有相关研究。王萌[3]对2219铝合金的蠕变时效温度及应力水平与力学性能做了相关的分析研究，并建立了一套宏微观统一的本构模型。孙找[4]研究了2219铝合金的蠕变时效成形过程中的蠕变断裂行为，并分析了其断裂机制。胥福顺[5]对2124铝合金蠕变时效成形的回弹量随预变形量的变化趋势作作了定量研究，其研究表明预变形量为3%时成形回弹最小。但是有关2219铝合金预变形量对蠕变时效及性能的影响鲜见报道。同时，由于蠕变时效成形是使大型构件在应力场与温度场的复合能场的作用下，利用材料的蠕变特性，实现蠕变成形与时效成性两者同步进行的一种先进的金属成形技术[6-7]。因此，不仅要研究蠕变特性（如胥福顺[5]对2124铝合金蠕变时效成形的回弹量的分析研究）保证其成形效果，而且还要研究时效后的各项性能指标以保证构件的成形性能。本文拟研究不同预处理对2219铝合金的蠕变时效行为及性能的变化规律，精确控制预

收稿日期：2019-06-12
基金项目：2016年益阳市指导性科技计划项目（项目编号：益科字〔2016〕51号29）
第一作者简介：尹旭妮，1989年出生，助教，研究方向为高性能铝合金时效成形研究。E-mail：yinxuni@163.com

变形量为蠕变时效构件成形提供理论基础。

1 实验

1.1 设备及试样制作

根据在珠海市某公司生产的RMT-D10电子式高温蠕变持久强度试验机的产品规格，按照金属拉伸蠕变及持久实验方法(GB/T 2039—1997[8])沿板材的轧制方向线切割出标准蠕变拉伸试样，其厚度为2 mm，标距为50 mm，材料的主要化学成分见表1[9]。时效前需对试样上下表面及侧面去除毛刺，并用水磨砂纸及金相砂纸进行打磨光滑处理，这样避免机加工在试样表面留下的刮痕而影响合金的力学性能而干扰实验结果。

表1 2219铝合金的化学成分表

Tab. 1 Chemical composition of 2219 aluminum alloy

%(*w*)

Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Ni	Zr	Ti	Al
5.24	0.028	0.27	0.042	0.13	0.03	0.14	0.065	Bal.

在设备电阻加热炉中进行固溶处理，2219铝合金的固溶温度为535 ℃，并将其保温36 min。然后在室温下进行水淬和不同的预变形处理，之后开展蠕变时效实验。

1.2 实验过程

将试样分为5组开展蠕变时效实验，由于变形量太大会导致合金的塑性急剧降低，所以初步设定预变形量分别为0%、1%、3%、5%、8%。该预变形量处理是在CMT-5105万能试验机上进行的。设定万能试验机的加载速度为2 mm/min，以预设的应变量为终止条件。在蠕变机上设定蠕变时效温度为175 ℃和蠕变时效应力为180 MPa。蠕变时效结束后取下试样待其冷却后进行显微硬度测试与常温力学性能测试。

2 结果及讨论

2.1 蠕变时效行为

图1为2219铝合金在0%、1%、%、5%、8%等不同预处理状态下同时效温度与时效应力的蠕变曲线。可以看出经过预变形的试样较未经预变形处理的试样在蠕变时效初始阶段出现较大的应变量，合金的应变变形随预变形量增大而增大。随着预变形量的增加，0%、1%、3%、5%、8%等不同预处理试样的最终的蠕变变形量为0.123%、0.268%、0.441%、0.519%、0.556%。对试样进行很小的预变形量处理如处理量为1%时，其蠕变变形量较未变形处理的蠕变变形量增加了118%。预变形量的增加促进了材料蠕变变形量迅速增加，这是因为引入预变形，合金内部的位错大量增加，同时也为铝合金提供了更多的可动位错，因此蠕变的变形量显著增加。在不同预变形处理条件下都表现出明显的蠕变第一阶段和蠕变第二阶段，而经过预变形处理的试样，预变形量越高，试样停留在蠕变第一阶段的时间越长，蠕变第二阶段稳态蠕变速率越小，试样最终的总蠕变应变量越大。引入预变形的方法解决了以往通过增加应力控制蠕变变形量的增加而导致材料在极短的时间进入蠕变第三阶段(即加速率蠕变阶段)致使材料极易断裂的问题。预变形处理的引入更能满足实际加工过程中的蠕变时效成形，大蠕变变形量保证其成形精度。

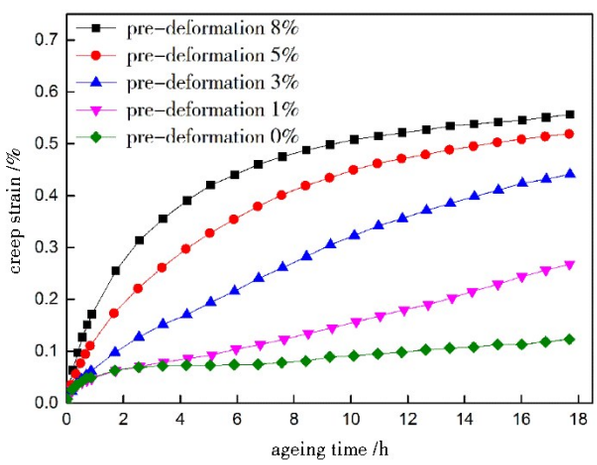


图1 不同预变形条件下2219铝合金的蠕变时效曲线

Fig. 1 Creep aging curves of 2219 aluminum alloy under different predeformation conditions

2.2 显微硬度

图2为初始的预变形量分别为0%、1%、3%、5%和8%的2219铝合金经同一蠕变温度和应力时效后的维氏硬度变化曲线图。

可以发现，随着预变形量的增加，合金的硬度没有得到及时的响应，整体表现为上升增长的趋势。当预变形量为3%时硬度值达到峰值为142.9HV。

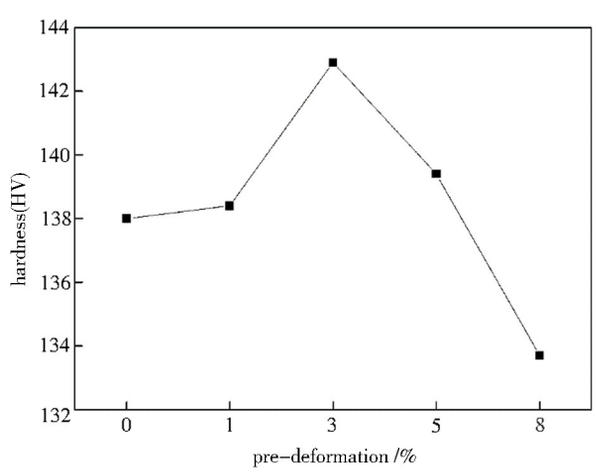


图2 不同预变形量条件下硬度的变化曲线

Fig. 2 Hardness curves under different predeformation conditions

随后，随着预变形量的继续增加，硬度值迅速下降，当预变形量为8%时，硬度值已经低于未经预变形时的硬度值，这可能是预变形的增加减弱了材料硬化效果。

2.3 常温力学性能

图3为初始的预变形量分别为0%、1%、3%、5%和8%的2219铝合金经同一蠕变温度和应力时效后的常温力学性能变化关系柱状图。可以发现，2219铝合金的屈服强度与抗拉强度均随着预变形量的增加而呈现上升趋势。在预变形量为3%时，合金的两强度指标达到最大，其屈服强度与抗拉强度分别为356.4和462.9 MPa。这与未经预处理后的蠕变时效性能屈服强度与抗拉强度分别提高了18.7%和8.6%。当合金的预变形量大于3%时，合金的强度随着预变形量的增加呈现了下降的趋势。

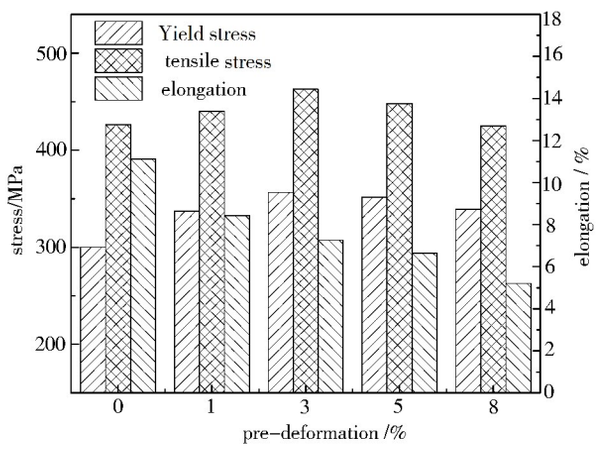


图3 不同预变形量条件下力学性能变化柱状图

Fig. 3 Bar chart of mechanical properties under different predeformation conditions

由图3可以发现，合金的延伸率随着预变形量的增加至始至终均呈现出下降的变化趋势。由此可知时效前对材料进行一定的预变形能够显著的增加其强度，但预变形量超过一定的范围时，2219铝合金的强度和延伸率等各项力学性能指标均呈现下降的趋势，最终导致了合金的综合性能的整体下降。此现象可以解释为，在预变形较低（如预变形量为1%）时，位错密度较低，位错强化作用对合金有较小的提高。而当预变形量增加时，材料的内部大量增加的位错，成为第二相的非均匀形核位置，使沉淀相尺寸更细小、分布的更均匀。因此，增加的位错不能切过的沉淀相，使合金的力学性能大幅度提高[10-11]。而后期随着预变形量的增加合金性能降低存在两种解释：第一种可能是当变形量继续增大虽然位错密度会继续增加，但是变形量的增加同时会导致晶界处的缺陷增加，晶粒间的结合强度将会减弱，在进行性能测试时晶界处的强度成为材料的短板，不利于强度及延伸率的提高[12]，同时预变形的增加会加速与基本完全共格的强化相的共面滑移，使大量的位错在滑移面与晶界的交叉位置堆积，引起应力集中，从而导致强度的降低；第二种可能是由于预变形量越大，晶体内引入的位错密度越高，从而材料的时效响应速度得到了一定程度的提高，即当合金的预变形量大于3%时，该预处理状态下的试样可能在目前讨论的蠕变时效制度下处于过时效状态，所以强度反而有所降低。因此，当时效制度有一定限制时（比如大型壁板时效成形的时效时间不能太短，若时效时间为11 h时），必须考虑预变形量应该保持在一定合适的范围，否则预变形量过大，可能导致合金处于过时效状态。同时，对不同的预处理，其表现的峰值时效时间可能不一样，所以各预变形处理的最佳时效制度是有必要进行继续探索的。

3 结论

（1）从不同预变形量下2219铝合金的蠕变曲线得出预变形越大蠕变应变量越大，因为预变形的引入为铝合金提供了更多可动的位错，所以引入预变形可使蠕变时效构件在成形过程中具有更好的成形效果。

（2）预变形处理的试样蠕变时效后的显微硬度与力学性能（屈服强度、抗拉强度及延伸率）远远大于未经过预变形处理后的试样。当预变形增加到一定程度时，显微硬度与力学性能呈现下降趋势，在预变形为3%，2219铝合金表现出最佳的时效性能，保证蠕变时效成形件具有更佳的成形性能。通过精确控制预变形量可为蠕变时效构件成形提供理论基础。

参考文献

[1] 温涛，张绪虎，文秀青，等. 2219铝合金热变形行为对精密旋压成形的影响[J]. 宇航材料工艺，2018，48(6)：45-48.

WEN Tao，ZHANG Xuhu，WEN Xiuqing，et al. Effect of 2219 Al-alloy's thermal deformation behavior on net shape spinning processing [J]. Aerospace Materials & Technology，2018，48(6)：45-48.

[2] 夏德顺. 航天运载器贮箱结构材料工艺研究[J]. 导弹与航天运载技术，1999(3)：32-41.

XIA Deshun. Technological research of tank structural material for launch vehicle [J]. Missiles and Space Vehicles，1999(3)：32-41.

[3] 王萌，湛利华，李文科，等. 2219铝合金蠕变时效研究及宏微观本构建模[J]. 热加工工艺，2017，46(6)：221-225.

WANG Meng，ZHAN Lihua，LI Wenke，et al. Creep aging

research and macro and micro constitutive modeling of 2219 aluminum alloy [J]. Hot Working Technology, 2017, 46 (6): 221-225.

[4] 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 Lihua1, 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.

[5] 胥福顺,张劲,邓运来,等. 预变形对2124铝合金蠕变时效形性同步的影响[J]. 中国有色金属学报,2017,27(1):1-7.

XU Fushun, ZHANG Jin, DENG Yunlai, et al. Effect of pre-stretching on synchronization of shape and property in creep age forming of 2124 aluminum alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(1): 1-7.

[6] MITCHELL C H. Autoclave age forming large aluminum aircraft panels[J]. J. Mech. , 1989, 20: 477-488.

[7] ZHAN Lihua, J L T A. A review of the development of creep age forming: experimentation, modeling and applications [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010 (51): 1-17.

[8] 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[J]. 冶金标准化与质量,1998(3):3-7.

LI Jiulin, LIANG Xinbang. The description for drawing up national standards for GB/T2039—1997 tensile creep and test methods for durability of metals [J]. Metallurgical Standardization & Quality, 1998(3): 3-7.

[9] 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,2014,24(9):2250-2256.

YIN Xuni, ZHAN Lihua, ZHAO Jun. Creep aging research and macro and micro constitutive modelling of 2219 aluminum alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(9): 2250-2256.

[10] 贾连锁,卫英慧,胡兰青,等. 稀土元素Ce和预变形对Al-Li-Cu-Zr合金时效相变过程的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2002,31(2):156-159.

JIA Liansuo, WEI Yinghui, HU Lanqing, et al. The effect of ce and pre-deformed process on aging transformation for Al-Li-Cu-Zr alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2002, 31 (2): 156-159.

[11] 昌荣,潘青林,王新宇,等,含钪Al-Cu-Li合金的形变时效研究[J]. 金属热处理,2004,29(10):1-4.

ZHOU Changrong, PAN Qinglin, WANG Xinyu, et al. Study of deformation-aging of Al-Cu-Li alloy containing Sc [J]. Heat Treatment of Metals, 2004, 29(10): 1-4.

[12] 刘斯仁. 预变形对Cp276型Al-Li合金变形性能的影响[J]. 稀有金属,1997,21(4):311-315.

LIU Sirong. Effect of pre-deformation on the deformation properties of Cp276 aluminum lithium alloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 1997, 21(4): 311-315.