

2219 铝合金带筋条板材蠕变时效成形试验研究

万 李¹ 杨浩亮¹ 丁鹏飞¹ 周世杰¹ 林建国²

(1. 首都航天机械公司, 北京 100076; 2. 帝国理工大学, 伦敦 SW7 2AZ)



摘要: 采用蠕变时效成形技术成形的带筋条壁板, 在成形过程中, 由于力的加载, 加快了稳定相的形成, 同时也诱发了惯析面上稳定相的析出, 使得经蠕变时效后成形的壁板整体性能得到加强; 通过蠕变本构方程的建立, 能较好地预测壁板成形后半径, 使得壁板型面精度得到大大提高。

关键词: 2219铝合金; 带筋壁板; 蠕变时效成形; 本构方程

Study on the Creep Age Forming of Iso-grid Panel of 2219

Wan Li¹ Yang Haoliang¹ Ding Pengfei¹ Zhou Shijie¹ Lin Jianguo²

(1. Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076; 2. Imperial College London, London SW7 2AZ)

Abstract: For the loading, iso-grid panel manufactured by creep age forming, accelerates the depletion of the solute into precipitates, induces the precipitates forming on the habit plane, strengthens the property of the panel; Constitutive equation of the creep age forming, can predict the radius of the panel and improve the accuracy of the panel.

Key words: 2219 aluminium; iso-grid panel; creep age forming; constitutive equation

1 引言

在宇航类产品中, 带筋条板材是壁板类零件重要组成部分。在以往的制造过程中, 此类产品一般采用压弯、滚弯、喷丸成形等方法。压弯、滚弯成形后的带筋条板材壁厚、加工精度及尺寸稳定性均存在一定的不足。时效成形技术是将板材放置在模具上, 在一定温度下, 保持一定的时间, 利用金属的蠕变特性, 在时效的同时, 完成成形过程^[1]。在此过程中, 材料经过时效强化和应力松弛两个阶段, 在改善材料微观组织的同时, 通过蠕变和应力松弛, 释放材料的应力, 在达到零件成形所需要的外形精度的同时, 释放零件内部的残余应力, 增强零件的应力腐蚀性能, 提高材料的力学性能。与喷丸成形相比, 由于添加了时效的步骤, 可成形时效强化的合金, 并且对零件外形具有更大的覆盖性^[2~4]。

2219 铝合金金属 Al-Cu 系, 为可热处理强化合金,

加工性能好, 在航空航天领域具有广泛的应用前景。本文对 2219 铝铜合金进行蠕变试验, 并验证其成形性能。

2 试样制备与试验方法

试验用料为 2219 铝铜系可热处理强化合金, 采用铝合金 6mm 板材。其化学成分如表 1 所示。

表 1 2219 铝合金主要化学成分

Cu	Mn	Ti	Si	Fe	Mg	Zn	Al
6.13	0.34	0.06	0.07	0.18	0.01	0.03	Bal.

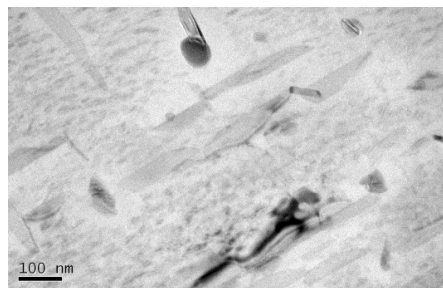
标准试样的选取沿板材轧制方向, 加工成标准试样进行基础性能测试; 成形样件从板材上切割后, 加工成 220mm×60mm×6mm 大小, 用于成形试验。试样由于其初始状态非 T4 状态, 因此, 首先进行固溶 (535℃), 然后快速取出, 放置在冷水中 (室温) 淬

火 30min, 之后在冰箱中放置, 保持其状态, 再进行蠕变时效。蠕变时效试验在定制的专用高温蠕变时效电子实验机上进行。选取蠕变试验温度为 175℃, 应力分别为 75~200MPa。拉伸试验在 Instron 5584 试验机上进行。透射电子 (TEM) 显微分析用通用透射电镜, 加速电压设置为 200kV。

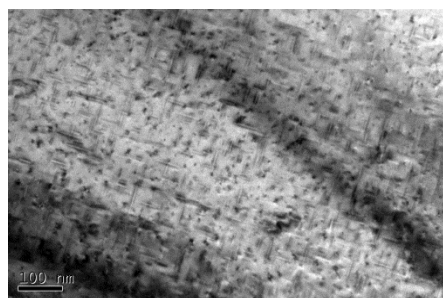
3 试验结果及分析

3.1 TEM

图 1a 为未经蠕变的人工时效 AA2219 铝合金, 从图中可看到存在两种粒子: 棒状粒子、球状粒子, 分布较为散落。棒状粒子经检测为 CuAl_2 (θ 相, 稳定相)^[5], 球状粒子弥散在棒状粒子周围。以球状粒子为中心, 其周围棒状粒子呈不规则 90°析出, 垂直角度位相效果并不明显, 这主要是由于球状粒子对于棒状粒子位相效应的抑制作用。可以解释如下, 弥散的球状粒子, 由于其体积的分布, 在局部形成应力场集中, 对粒子各个方向上应力大小形成差异, 影响析出相形核, 长大, 并进而影响析出相的位相分布。



a 人工时效 TEM



b 蠕变时效 TEM

图 1 AA2219 铝合金人工时效与蠕变时效比较

图 1b 为经蠕变时效后的 AA2219 铝合金。与图 1a 较为相似, 图 1b 中也清晰地显示两种粒子, 一种为棒状粒子, 一种为球状粒子, 但棒状粒子呈密集分布, 球状粒子分布在棒状粒子中间。且棒状粒子基本呈 90°夹角。从动力学角度出发, 在蠕变过程中, 由

于有外力的加载, 晶体内部的位错急剧增加, 增加的位错为稳定相的形成提供有利的条件, 促使稳定相的形核、长大, 同时也引发了惯析面稳定相的析出。惯析面稳定相的析出, 对材料的力学性能强化起着显著的作用, 有利于提高构件成形后的性能。

3.2 蠕变试验

蠕变试验温度在 175℃条件下, 分别施加 75~200MPa 等不同应力。不同的蠕变曲线如图 2 所示。从蠕变曲线看, 不同应力条件下的蠕变曲线有着相同的趋势 (符号线), 即在本试验应力条件下, 所有的蠕变呈现两个阶段, 第一阶段为蠕变速率递减阶段, 到达第二阶段时, 其速率呈稳定阶段。但施加应力达到 200MPa 时, 标准试样出现细微的裂纹, 说明此时材料已进入蠕变的第三阶段初期, 即加速断裂阶段。

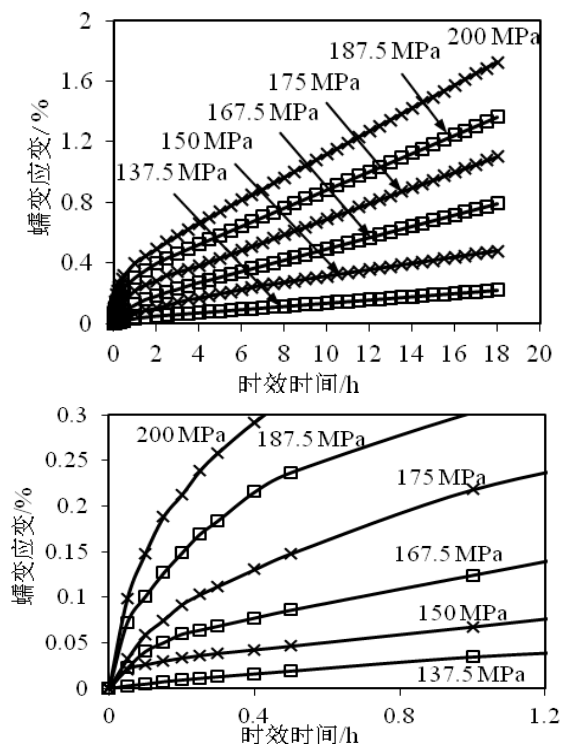


图 2 2219 在 175℃不同应力条件下蠕变曲线 (下为放大图)

考虑到蠕变本构方程的建立及实际成形过程发生在蠕变第一、第二阶段, 施加的应力载荷以 200MPa 为限建立蠕变的本构关系。

蠕变本构关系的确立, 基于统一理论和晶粒长大动力学及析出强化理论。由于 7xxx 系铝合金蠕变时效本构方程已被国内外多家研究机构所验证^[6, 7], 具有较好的应用和参考价值。在 2219 铝合金本构的建立中, 充分借鉴 7xxx 系铝合金蠕变本构, 将应力应

变与微观组织的演化并行考虑。在此基础上进一步细化析出相长大、分布以及强化模型，建立只考虑蠕变第一、第二阶段的、如下简化本构模型^[8]：

$$\dot{\varepsilon} = A \sinh[B(\sigma - \sigma_A)(1 - H)^{m_0}] \tag{1}$$

$$\dot{H} = \frac{h}{\sigma^{m_1}} \left(1 - \frac{H}{H^*}\right) \dot{\varepsilon} \tag{2}$$

式中：A，B，σ_A，h，H*，m₀，m₁ 为与材料相关的常数。上述公式采用 MATLAB 编程，计算方法采用 Runge-Kutta 法，最终确定材料常数。

将确定的材料常数代入本构方程进行蠕变时间-蠕变量拟合，与试验数据进行比较（图 2 实线），可以看出，二者能较好地吻合。能较为准确地反映蠕变时效成形过程。

3.3 拉伸试验

对经蠕变时效及仅时效的样品进行力学性能的检测，检测结果如表 2 所示。

表 2 时效及蠕变时效样品力学性能值比较

样品	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%
时效	418	280	12
蠕变+时效	436	322	7.5

从表可知，仅时效的 2219 材料，其延伸率相对较好，但抗拉强度及屈服强度值，相比较蠕变时效 2219 材料而言较低。这种情况符合 TEM 的结果与分析。这说明，经过蠕变时效的产品，在成形的同时，其力学性能也会相应得到提高，主要是由于在成形过程中，由于热激发引起的位错移动、空位及原子的扩散对材料的力学强度有着较大的影响。

3.4 成形试验



图 3 带筋板材蠕变成形及仅发生时效成形板材比较

蠕变试验表明所建立的本构是符合金属的成形特性，为此，通过上述本构模拟设定一带筋板材成形 R 值，进行蠕变时效成形，同时将未发生蠕变的带筋

板材成形（弯曲后时效）作为比较，如图 3 所示。

图 3 中，曲率半径较小的为蠕变时效成形后带筋板材，曲率较大的为未发生蠕变时效变形的带筋板材，由图可知，与经过弯曲+时效的板材相比，蠕变时效成形时，板材发生了较大的塑性变形，说明部分蠕变引起的变形量在成形时转化成塑性变形量，从而使得塑性变形趋势变大，更有利于变形，经测量，蠕变变形后曲率达到设定 R 值，而弯曲+时效板材曲率半径大于设定半径值。

4 结束语

- a. 在蠕变时效过程中，与人工时效试样不同，蠕变时效析出相呈现出较为明确的位相，基本呈 90° 夹角，能显著提高材料的力学性能。
- b. 蠕变本构的建立，可以反映材料的成形行为，能较好地模拟板材的成形，成形中部分蠕变应变转化为塑性变形，对型面的形成起着一定的作用。

参考文献

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

2 李劲风，郑子樵，李世晨. 铝合金时效成形及时效成形铝合金[J]. 材料导报，2006，20(5)：101~103

3 Denise M. Hambrick. Age forming technology expanded in an autoclave [C]. SAET ransaction, 1985. 94

4 Brewer H. Age forming integrally stiffened [C]. Aluminum Aero space Structures in an Auto clave, AIA A89-2087

5 Srinivasa Rao et al. Microstructure and high temperature strength of age hardenable AA2219 aluminium alloy modified by Sc, Mg and Zr additions. Material Science and Technology 2009, 25: 92~101

6 Ho K C, Lin J, Dean T A. Modelling of spring back in creep forming thick aluminium sheets [J]. International Journal of Plasticity. 2003, 20(4-5): 733~751

7 Lin J, Ho K C, Dean T A. An integrated process for modelling of precipitation hardening and spring back in creep age-forming[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2006, 46: 1266~1270

8 欧玲，聂宇峰. 铝锂合金蠕变本构模型的建立. 塑性工程学报[J], 2012, 19(5): 16~19