

蠕变时效成形的关键技术及应用

Key Technology and Application of Creep Age Forming

沈阳航空工业学院航空宇航学院 韩志仁 秦政棋 祁贵根

[摘要] 蠕变时效成形是实现大型蒙皮和壁板件成形的有效方法。分析了蠕变时效成形的原理,结合试验分析了蠕变时效成形的实际效果,详细论述了载荷施加方式和型面确定方法等关键技术,并阐述了蠕变时效成形可能的应用领域和应用前景。

关键词: 蠕变 时效 成形 有限元

[ABSTRACT] The principle of the creep age forming and the practical effect of the creep age forming are analyzed by means of tests. Some key technologies, such as the loading method and method of die surface determination are described in detail. The possible application and the prospect of the creep age forming are introduced.

Keywords: Creep Age Forming FE

在航空工业中,对飞机钣金件成形后的性能要求在不断提高,包括提高强度和刚度、减轻重量、提高抗疲劳断裂的能力等^[1-2],蠕变时效成形由于能满足这些要求而得到发展,在“湾流”的机翼上蒙皮、GIV、B-1B和空客 A330/340/380上都采用了蠕变时效成形方法。蠕变时效成形是指蠕变、应力松弛和时效通过压力罐等手段综合在一起完成的工艺过程。在蠕变时效过程中,钣金材料被加热到人工时效温度,然后通过真空袋技术对板料加压使其向模具移动。一旦板料贴模,在压力的作用下保持板料位置不变,并且控制在一定时间范围内应力松弛发生。在这个阶段,金属纤维组织发生改变,提高了材料的屈服强度。但板料上的压力释放以后,板材会出现回弹。回弹是由于完成合适的机械性能要求的时效时间有限,弹性变形没有能够完全转化为塑性变形。然而与滚轧成形、轧压成形、喷丸成形、拉伸成形等其他传统方法相比,蠕变时效成形件最后的残余应力很小。这样,由于提高了抗断裂疲劳性能,成形件的耐久性能得到改善。与其他的成形技术有所不同,蠕变时效成形的变形发生在低应力水平,并且塑性变形的程度直接与时效时间和温度有关,因而伴随着成形过程的析出硬化,析出硬化强化材料降低蠕变率,与材料蠕变成形相关的特

性比传统的蠕变和应力松弛特性更复杂。例如由于时效热处理,材料的屈服强度提高 15%~20%。

1 蠕变时效成形技术现状

为了使蠕变时效成形能在实际中得到应用,各国的科技人员进行了很多研究工作,主要从蠕变时效成形材料制备、蠕变时效的微观机理、统一的蠕变时效本构方程、成形后的回弹、蠕变时效成形对材料性能的影响及工艺参数对材料性能的影响等方面进行研究。

蠕变时效成形过程中可能改变合金的微观组织,降低耐损伤性。X.D. Du 研究了时效过程对蠕变包含 0.1% 铝铝合金裂纹生长速度的影响,分析了时效析出相尺寸和分布对铝合金时效裂纹生长速度的影响,结果表明过多的 Al_3Zr 在 250 °C 时效 48h 条件下能够由阵中析出。粒子细化并分散,位于晶界边缘上,这些粒子有效地阻止裂纹生长,表明少量的铝具有强大的阻止蠕变裂纹生长的能力。在 200 °C 时效 48h 或 250 °C 时效 24h,析出粒子不能有效地阻止蠕变裂纹的成长。在 300 °C 时效 48h 后,铝合金就丧失了原来的性能。M.J. Starink 等人研究了 Al-Cu-Mg-Li (Mn, Zr, Sc) 铝合金微结构、析出相、时效成形性和损伤在时效成形中的关系。在不同的时效条件下蠕变时效成形对合金屈服强度、韧性及抗疲劳裂纹扩展性能影响不同,因此需要研究具有良好时效性能的材料及相应的最佳时效条件。特别是下翼面蒙皮,如果采用蠕变时效成形方法进行加工,则对材料的要求更高,因为下翼面处于拉应力状态,对疲劳要求高,同时要求时效成形不能降低耐损伤性。针对下翼面用的蠕变时效成形材料,英国南安普敦大学设计了一系列 Al-(1.5~2.5)Cu-(0.8~1.2)Mg-(0.5~1.5)Li-(Zr-Mn) 铝合金^[3-4];2001 年法国申请了一种新型 Al-Cu-Mg 系列铝合金专利^[5],该铝合金具有较好的时效成形性能。

时效成形时构件是在一定的应力下产生时效作用的条件下制成的,应力的存在对一些铝合金的微观组织产生了很大影响,特别是对析出相的取向产生很大影响。一些技术人员从微观角度研究了时效的机理及组织变化,为工艺优化提供基础理论。Zhu 等研究

了 Al-xCu 合金在一定压力下人工时效后的微观组织,发现应力时效时板片状相由无应力时的垂直排列转变为定向排列。BaKavos 等在研究 2XU 铝合金拉应力作用下的时效时同样发现合金中板片状相转变成定向排列。Zheng 等在研究 Al-3.88Cu(析出相为 θ) 及 Al-3.87Cu-0.56Mg-0.56Ag(析出相为 θ) 合金拉应力时效微观组织时也发现 θ 及 θ' 呈择优取向析出。及 θ' 等析出相的应力位向效应可能导致材料的各向异性。另外还发现时效初期进行短时间的应力时效再施以长时间无应力时效时,析出相 θ 及 θ' 呈择优取向析出;而先进行短时间的无应力时效再施以长时间应力时效时,未发现应力取向效应。这一研究结果对确定时效成形工艺具有指导意义。

为了通过蠕变时效成形得到高精度的成形零件,需要研究材料的宏观力学行为。一些科研人员针对具体的材料进行了蠕变时效本构研究。K.C. Ho 等^[6]针对铝合金材料时效成形中的蠕变提出了本构方程,并根据此本构模型发展了适合蠕变时效成形中回弹预测的有效数值方法^[7]。基于统一的 AA7010 在 150 °C 蠕变时效本构方程,研究了板厚、单曲率弯曲和双曲率弯曲、时效时间、应力松弛特性对回弹的影响,结果表明此算法可以准确地预测回弹,并给出几何数据。J. Lin 等首先提出新的统一的蠕变时效本构方程,此方程基于高温蠕变和时效动力学,这个新的材料模型通过二次开发应用在 ABAQUS 求解器中形成了一个完整的蠕变时效和回弹的模拟过程。除了应力松弛外,还估计了蠕变时效中的析出生长和屈服应力等。S. P. Narimetla 等也提出了一种简单的蠕变时效本构方程。

基于合理的本构方程进行蠕变时效成形的有限元分析进行回弹预测是解决蠕变时效成形在生产中应用问题的关键。专家们在回弹预测研究方面做了很多工作^[7,8,9-12]。K.C. Ho 等基于标准的蠕变本构方程采用有限元方法预测薄铝板蠕变成形中的回弹,这个模型模拟主要的硬化、时效、蠕变损伤和它们在铝合金蠕变变形中的影响。回弹影响通过铝件进行了研究,一个是单曲率柱件,另一个是双曲率球形件,他们研究了不同成形条件下铝板的应力松弛和蠕变变形,研究了成形工艺和材料板厚对回弹的影响,对单曲率和双曲率件在不同条件下的回弹进行了预测和比较。

2 蠕变时效成形原理

蠕变时效成形是在一定温度和外力的作用下,材料缓慢变形的过程,其中伴随着蠕变、应力松弛和时

效的综合作用。蠕变时效阶段材料表现出粘性特性,可以用改进的 Burgers 模型来描述,式(1)为其数学表达式,图 1 为 Burgers 模型结构图。

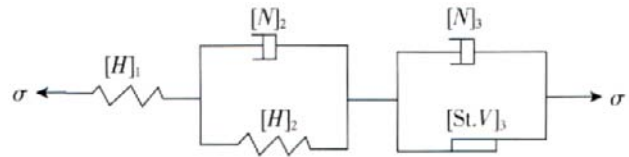


图 1 Burgers 模型结构

Fig.1 Burgers model structure

$$\sigma(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2}{K_2} t\right) \right] + \frac{\sigma_0}{K_3} \left[1 - \exp\left(-\frac{K_3}{\sigma_0} t\right) \right], \quad (1)$$

蠕变时效成形包括快速加载、蠕变时效两个主要阶段。在快速加载阶段,成形件由室温开始快速升温到蠕变时效温度,同时伴随着载荷的施加,在此阶段中发生瞬间弹性变形和瞬间塑性变形。快速加载阶段后进入蠕变时效阶段,在此阶段中温度保持不变,工件与凹模保持贴模状态,工件形状基本保持不变,主要产生应力松弛现象,使材料内的反力降低。蠕变时效阶段也是一个蠕变过程,使工件中塑性变形不断增加,同时材料在整个过程中都伴随着时效。通过 Burgers 模型结构图可以对蠕变时效阶段的变形过程进行分析。快速加载阶段后工件的形状维持不变,Burgers 模型中变形由 3 部分组成,即弹性变形、粘弹性变形和粘塑性变形,粘弹性变形、粘塑性变形是时间相关的,蠕变时效阶段在外力的作用下粘弹性应变和粘塑性应变随着时间的推移逐渐增加,弹性应变减小,转化为粘弹性应变和塑性应变。因此工件在成形完成后的形状与快速加载阶段的塑性应变和蠕变时效阶段的粘塑性应变之和有关,而刚刚完成的成形件中除残余的弹性变形外,还有粘弹性变形存在,粘弹性变形会随时间的推移逐渐释放出来。

蠕变时效成形主要研究的对象是蠕变时效阶段工件中应力、应变的变化问题,蠕变时效阶段实质上包括两个主要的变化:一是蠕变和应力松弛的作用使塑性变形增加,弹性变形减小,从而减小成形后工件的回弹量;二是整个过程伴随着材料的热时效,减小了残余应力,并改变了材料的强度。

为了掌握蠕变时效成形对消除回弹的效果,作者采用钣金弯曲试验的方法进行了研究,具体的参数见表 1。用相同的弯曲模和试件分别进行了弯曲冷成形和弯曲蠕变时效成形试验,图 2 给出了两种情况下回

表 1 弯曲蠕变时效成形参数

材料牌号	蠕变时效温度	蠕变时效时间	弯曲角度
LC4	200	24h	90°

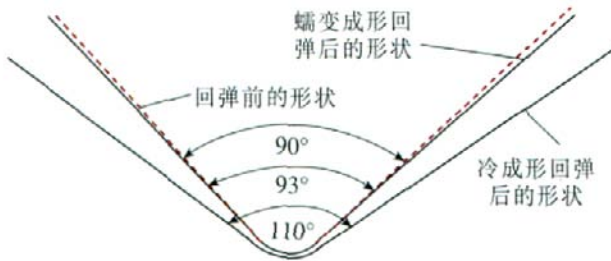


图 2 冷弯曲与蠕变时效成形对比
Fig.2 Comparison between cool-bend and bend creep age forming

弹前后的成形件形状,可以看出弯曲蠕变时效成形对消除回弹有明显的效果。

3 蠕变时效成形的关键技术

蠕变时效成形的主要好处是成形精度高、重复性好、工艺稳定、能够生产多曲率复杂形状的厚蒙皮和整体壁板件等大型钣金件。蠕变时效成形在一次成形中可以得到非常接近要求的形状,如果模具型面预先考虑了回弹,则可以一次完成成形,得到合格的产品。蠕变时效成形中的关键技术包括载荷施加、模具型面确定、模具结构设计与制造、工艺参数的确定等。

(1) 载荷施加。

大型钣金件蠕变时效成形采用真空负压和正向加压相结合的方式加载,这种方式相对容易实现。因为如果采用其他的设备或机械方法加载,首先没有合适的大型设备,同时需要大量的工装,必然导致成形成本大幅增加。图 3 为热压罐蠕变时效成形装置示意图,图中的密封装置一般采用真空袋。

(2) 蠕变时效成形模具型面确定。

蠕变时效成形中要得到高精度的工件,必须预先考虑模具型面的回弹。虽然蠕变时效成形后工件的回弹量较小,但仍需要通过补偿的方法消除回弹的影响,以便得到高精度的产品。要根据产品的形状和回弹综合考虑来确定模具型面,回弹的预测是一项关键技术,可以采用两种方法:一是建立三维变形转换函数^[13],二是用有限元方法预测回弹。

K. Idem 应用一种蠕变时效的材料特性模型进行了有限元模拟,模型中加载和卸载遵从线弹性规律,

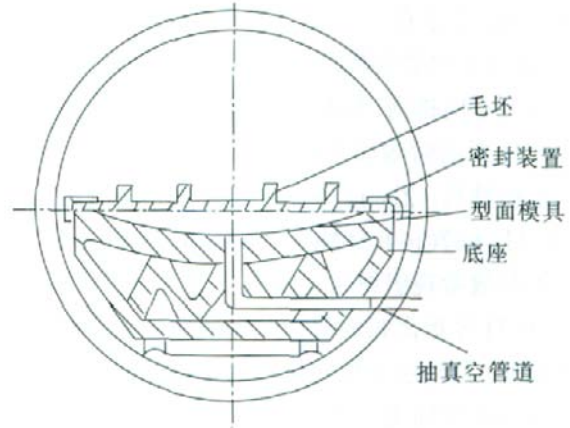


图 3 热压罐蠕变时效成形
Fig.3 Creep age forming in autoclave

而时效项则遵从非线性应力松弛规律。K.C. Ho 也对蠕变时效中材料的本构和有限元模拟进行了研究^[6]。其中,在蠕变时效成形有限元模拟中材料的本构是一个关键问题,直接影响模拟精度。图 4 为利用有限元方法确定模具型面的框图。

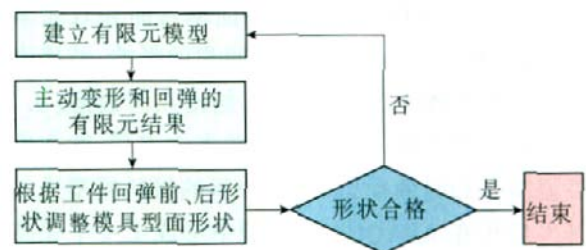


图 4 模具型面确定框图
Fig.4 Block diagram of mould surface determination

(3) 模具结构设计与制造。

由于蠕变时效成形是通过气压加载在时效温度下完成成形的,因此模具不仅具有尺寸大、型面形状复杂的特点,而且模具材料需要在适合的时效温度下工作,模具结构要适合于真空加载。模具一般采用组合结构,主要由基座和肋条构成,其中基座起支撑作用,保证整个模具有足够的刚度,而型面由肋条保证,肋条间的空隙便于采用真空加载。采用组合机构还有利于模具型面的局部修形和调整。

(4) 工艺参数的确定。

蠕变时效成形的工艺参数除了模具参数外主要包括时效温度、真空负压和正压的大小、时效时间等。工艺参数主要根据材料的蠕变、应力松弛性能参数和时效参数确定,也需要做少量的工艺试验。

