

铝合金时效成形的试验研究

张志国¹ 甘忠¹ 袁胜² 马泽恩¹

(1 西北工业大学机电学院,西安 710072)

(2 成都飞机工业(集团)公司制造工程部,成都 610000)

文 摘 应用应力松弛理论,分析时效成形的影响因素,设计误差可调的纯弯曲变形试验装置,通过正交试验获得 T 、 k 、 R_0 对目标 的影响的主次顺序,研究结果为建立成形参数与弯曲半径之间的函数关系以及回弹预测提供参考依据。

关键词 时效成形,应力松弛,正交试验

Age Forming of Aluminum Alloy

Zhang Zhiguo¹ Gan Zhong¹ Yuan Sheng² Ma Ze en¹

(1 School of Mechatronics, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072)

(2 Manufacture Engineering Department, Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co. Ltd, Chengdu 610000)

Abstract The factors affecting age forming were analyzed based on stress relaxation theory. A pure bending experimental device which error can be adjusted was designed. The importance of deformation parameters to forming efficiency is worked out by means of orthogonal experiment with 2A12CZ alloy, useful to establish a function relation between the deformation parameters and bending radius and predict the springback.

Key words Age forming, Stress relaxation, Orthogonal experiment

0 引言

高温铝合金在人工时效过程中发生应力松弛效应,可将部分弹性变形转化为塑性变形。这一成形方式与传统的冷加工塑性变形不同,利用材料时效强化和应力松弛特性,能在成形的同时改善了材料的微观组织,提高材料强度,降低残余内应力水平,增强耐应力腐蚀能力,延长零件的使用寿命^[1]。

时效成形在制造曲率复杂的大型壁板方面,表面光滑,形状准确度高,内应力很小,尺寸稳定,人为因素小,制造重复性好,具有比喷丸成形更为优良的工艺性能。波音、空客、洛克威尔、英国航空等公司已将该技术用于铝合金、钛合金整体壁板的成形或校形。1985年美国 Textron 公司发明热压罐时效成形工艺至今,已经生产出 B-1B 远程轰炸机等大型机翼壁板,2005年首飞的双层客机 A380,机翼上壁板长达 33 m,也是利用该成形技术生产^[2-3]。国内曾用应力松弛校形消除零件的回弹翘曲,但在应力松弛时效成形方面缺乏基础研究,制约了我国大型运输机、预警机高承载机翼的研制。

由于时效成形包含弹性变形、塑性变形、蠕变、应力松弛、热应力等复杂过程,其成形受温度、时间、材料类型、厚度变化、初始变形等多个参数的影响,但其

影响程度和相互关系尚待明确。本文从等厚度铝合金板料单曲率弯曲成形出发,分析得出成形效率的主要影响因素,利用正交试验分析影响因素。

1 试验

1.1 试验装置

图 1 为自行研制的试验装置。

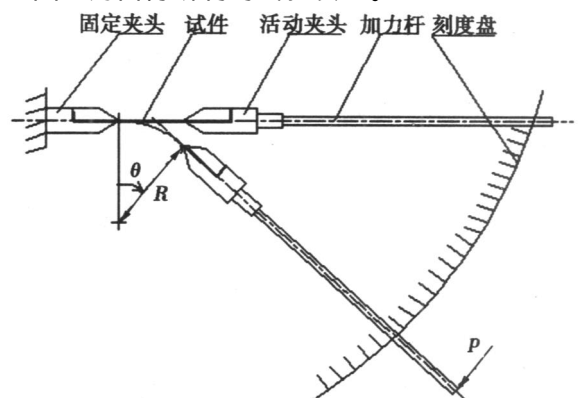


图 1 近似纯弯曲试验装置原理图

Fig 1 Principle diagram of approximate pure bending experimental device

在图 1 所示装置中,试件夹持在固定夹头与活动夹头之间。在加力杆的端头施加力 P ,试件即在此力

收稿日期:2007-07-10;修回日期:2007-08-24

作者简介:张志国,1981年出生,硕士,主要从事现代集成制造技术的研究

宇航材料工艺 2008年 第2期

— 57 —

造成的弯矩下弯曲。 p 力形成的弯矩如图 2 所示。

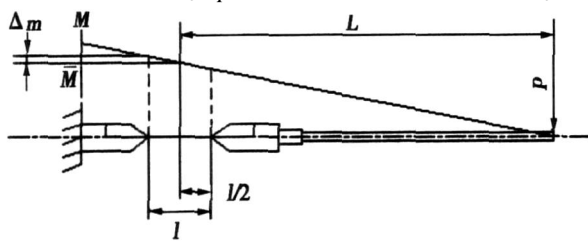


图 2 压力 p 造成的弯矩

Fig 2 Moment produced by perpendicular concentrated force in shank end

若取试件 midpoint 处的弯矩为 M , 则在整个试件测量段上所受的弯矩与 M 的最大差值为:

$$M = \pm \frac{pl}{2} \quad (1)$$

而相对误差:

$$m = \frac{M}{M} = \pm \frac{l}{2L} \quad (2)$$

表 1 2A12 合金及试验用料成分

Tab 1 Components of alloy 2A12 and test material

%(质量分数)

材料	Cu	Mg	Mn	Fe	Ti	Zn	Si	Ni	Al
2A12	2.8~4.9	1.2~1.8	0.3~0.9	0.5	0.15	0.3	0.5	0.1	余量
试验用料	4.71	1.47	0.62	0.35	0.10	0.25	0.20	0.1	余量

2 时效成形影响因素

高温合金时效过程中发生应力松弛,总应变 ϵ_0 中的弹性应变 ϵ_e 随 ϵ_0 减小而减小,并转化为蠕变应变 ϵ_p ,如图 3 所示^[4]。

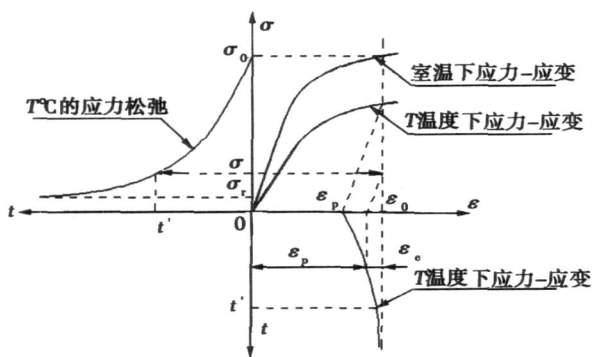


图 3 应力松弛中的应力—应变规律

Fig 3 Law of strain and stress in stress relaxation

由虎克定律可知:

$$\sigma = E \epsilon = E (\epsilon_e + \epsilon_p) = E \epsilon_e + E \epsilon_p \quad (3)$$

式中, E 与 E_T 分别为室温和温度 T (对铝合金是时效温度) 的弹性模量, ϵ_0 为初始弹性应变。

决定应力松弛成形效果最主要的因素是温度。

在上述装置中,若将试件视为在纯弯曲状态下变形,所产生的相对误差将不大于 m 。通过选择 l 与 L 的大小,可以达到满意的精度。本试验中取 $l = 100$ mm, $L = 1085$ mm, $m = \pm 0.046$ 。

时效保温设备采用电热恒温干燥箱,温度误差为 ± 1 。测量工具采用最小刻度为 0.01 mm 的工具显微镜,分别观测试件在加载、卸载状态时的外形坐标,然后用最小二乘圆算法拟合其弯曲半径^[6]。

1.2 试验材料

采用规格为 170 mm \times 30 mm \times 2.0 mm 的 2A12 冷轧板带材,退火状态,化学成分见表 1。

在硝酸盐槽中对 2A12 试样进行固溶处理 (498 / 10 min),在室温自然时效 96 h。

当其他条件相同时,温度愈高,应力松弛的速率愈快, ϵ_p 和 ϵ_e 愈小;但当 ϵ_p 接近 ϵ_0 时,再延长保温时间也不会起多大的作用。因此,这种成形方法,并不能完全消除回弹,只不过使回弹控制在允许范围之内。提高 ϵ_0 可加快松弛过程,但这种影响只表现在第一阶段,而这一阶段时间很短,对缩短总的成形时间不起显著的作用。

影响铝合金弯曲成形效率的因素有 3 个,即时效温度 T 、保温时间 t 、产生初始应力 σ_0 的预弯曲半径 R_0 。

3 正交试验设计

影响铝合金板料时效成形效率的因素较多,故采用正交试验的方法设计试验方案。

3.1 评价指标

平板成形效率系数 η 可定义为:

$$\eta = R_0 / R_f \times 100\% \quad (4)$$

式中, R_0 为初始成形的曲率半径, R_f 为时效成形完毕产生回弹后的曲率半径。在保证材料力学性能不低于 HB/25126—79 规定的性能指标前提下,成形效率越高越好。

3.2 因素水平确定

由于 T 、 t 和 R_0 是影响 η 的主要因素。每因素取六水平,水平取值考虑到铝合金应力松弛特性。因素水平见表 2。

表 2 正交试验因素水平表

Tab 2 Form of different patterns of orthogonal experiment

水平	R_0 /mm	T /	t /h
1	550	50	0.5
2	1000	100	1
3	1500	125	2
4	2200	150	6
5	3000	175	12
6	4500	200	24

3.3 正交表选用

为了提高试验效率,采用 $L_{36}(6^3)^{[7]}$ 正交表,实验结果见表 3。

表 3 正交试验结果

Tab 3 Results of orthogonal experiment

序号	R 的水平	T 的水平	t 的水平	/%
1	1	1	1	4.823
2	1	2	2	16.220
3	1	3	3	39.157
4	1	4	4	72.507
5	1	5	5	84.400
6	1	6	6	96.558
7	2	1	2	6.692
8	2	2	1	8.405
9	2	3	4	47.027
10	2	4	3	57.869
11	2	5	6	87.159
12	2	6	5	96.244
13	3	1	3	9.395
14	3	2	4	32.218
15	3	3	5	52.129
16	3	4	6	75.699
17	3	5	2	71.325
18	3	6	1	59.876
19	4	1	4	12.099
20	4	2	3	26.207
21	4	3	6	61.240
22	4	4	5	74.282
23	4	5	1	49.127
24	4	6	2	87.467
25	5	1	5	17.119
26	5	2	6	45.429
27	5	3	1	28.175
28	5	4	2	64.322
29	5	5	3	79.382
30	5	6	4	99.35
31	6	1	6	22.801
32	6	2	5	36.366
33	6	3	2	20.344
34	6	4	1	27.846
35	6	5	4	88.793
36	6	6	3	68.356

由表 3 可以看出,成形效率随因素水平的变化而变化;30^号试验条件得到的结果最好,成形效率达到 99.35%。

4 结果及分析

表 4 列出极差分析结果。

宇航材料工艺 2008年 第 2期

表 4 极差分析结果

Tab 4 Results of error analysis

水平	R_0 /mm	T /	t /h
1	I(550)	I(50)	I(0.5)
2	II(1000)	II(100)	II(1.0)
3	III(1500)	III(125)	III(2.0)
4	IV(2200)	IV(150)	IV(6.0)
5	V(3000)	V(175)	V(12.0)
6	VI(4500)	VI(200)	VI(24.0)
T_1	313.67	72.93	178.25
T_2	303.40	164.84	266.37
T_3	300.64	248.07	280.37
T_4	310.42	372.53	289.01
T_5	335.77	460.19	425.52
T_6	264.51	509.84	388.89
m_1	52.28	12.16	29.71
m_2	50.57	27.47	44.40
m_3	50.11	41.35	46.73
m_4	51.74	62.09	48.17
m_5	55.96	76.70	70.92
m_6	44.09	84.97	64.82
R	11.88	72.82	41.21

由表 4 可知,影响成形效率因素的主次顺序: $T > t \gg R_0$ 。如果仅以提高成形效率为目标,对因素 T 单独分析时应取水平 6(即 200);因素 t 应取水平 5(即 12 h);由于因素 R_0 影响较小,可以根据目标成形曲率半径选取。

5 结论

(1)对于材料简单弯曲的时效成形,在板带材料给定的情况下,影响试件成形效率的工艺参数的主次顺序是: $T > t \gg R_0$ 。

(2)对于厚度为 2.00 mm 的 2A12CZ 冷轧板带,时效成形的最佳温度可稍高于人工时效规范而达到 200,保温时间可选择在 10~12 h,获得的成形效率将达 95%以上,且材料常温力学性能可保持较高水平。

参考文献

- Denise M Hambrick Age forming technology expanded in an autoclave. Society of Automotive Engineer, Inc, 1986
- Holman M C Autoclave age forming large aluminum aircraft panels. Journal of Mechanical Working Technology, 1989; 20: 477~488
- Mohamad Sallah, John Peddieson, Jr Saeed Foroudestan. A mathematical model of autoclave age forming. Journal of Materials Process Technology, 1991; 28: 211~219
- 周贤宾,常和生,戴美云.时效应力松弛校形原理及其在蒙皮制造中的应用.北京航空航天大学学报,1992;(2)
- 航空制造工程手册——飞机钣金工艺.北京:航空工业出版社,1992
- 马泽恩.计算机辅助塑性成形.西安:西北工业大学出版社,1995
- 北京大学数学力学系概率统计组.正交设计法.北京:石油化学工业出版社,1975

(编辑 吴坚)