

LD10 铝合金残余应力测试及分析^①

王元良 陈明鸣
(西南交通大学, 成都 610031)

摘 要 对 LD10 铝合金加工后的去应力处理工艺的残余应力用小孔释放法进行了测试, 对不同热处理工艺和加工后的去应力处理工艺对残余应力的影响进行了分析。结果表明: 加工以后使应力重新分布和使残余应力降低或均匀化, 冷热循环去应力处理效果很小。

关键词 铝合金 加工 去应力处理 残余应力

LD10 铝合金是一种高强铝合金, 主要成分为: Mg 0.4% ~ 0.8%, Mn 0.4% ~ 1.0%, Cu 3.9% ~ 4.8%, Si 0.6% ~ 0.2%。将其在 495~ 505 °C 水淬固溶, 然后再经 150~ 160 °C 6~ 15 h 人工时效后, 力学性能分别为 σ_b 470 MPa, σ_s 372 MPa, δ_5 10%, 硬度 HB135。该合金由于其强度高而较多地用于需要减轻重量的各种高强铝合金结构。在应用中, 铸造、挤压、轧制、锻造、热处理、加工和焊接等工艺均会形成不均匀残余应力; 这些残余应力不仅影响结构强度, 也影响结构尺寸稳定性及精度。国外有一些关于铝合金挤压残余应力和焊接残余应力的测试结果^[1], 但无热处理和加工残余应力的测试结果, 更未看到 LD10 铝合金的有关热处理和加工残余应力的报道。根据用户的要求, 本文在这方面进行了一些测试及分析。

1 小盲孔应力释放法

测试残余应力的方法很多^[2], 且各有优缺点。本文选用了行之有效的应力测试方法——小盲孔应力释放法。使用的仪器有 CZ-5 测定仪和相匹配的应变花, 应力测试则使用数字应变仪。小盲孔释放法测试残余应力方法基本原理是: 在有残余应力的板上钻一直径为 2 mm、深度为 2 mm 的小盲孔, 使附近应力释放产生

位移和应变, 并由此求出钻孔处的应力, 因此首先必须进行应变释放系数的标定, 求出标定系数 A , B 。

1.1 应变释放系数标定

1.1.1 标定试件及贴片

标定试件的形状、尺寸及贴片方位如图 1 所示。

1.1.2 标定方法

按 80 MPa 应力加载 (2 800) 5 次, 同时调整偏心 ($< 5\%$)。分级加载 1 000, 1 200, …… 2 400, 2 600, 每次稳定后记录数据; 钻盲孔深 2 mm, 然后按未钻孔时的同样方法分级加载并记录数据, 计算 γ :

$$\lg \gamma = (\epsilon_1 - 2\epsilon_2 + \epsilon_3) / (\epsilon_1 - \epsilon_3),$$

当 $\gamma < -2^0$ 或 $> 2^0$ 时重做。

1.1.3 A , B , K_1 , K_2 的计算

测试结果可由下式计算

$$A = (\epsilon_x + \epsilon_y) / 2\sigma$$

$$B = (\epsilon_x - \epsilon_y) / 2\sigma$$

$$K_1 = \epsilon_x / \epsilon$$

$$K_2 = -\epsilon_y / \mu\epsilon$$

$$\epsilon_x = \epsilon_{3k} - \epsilon_{30}$$

$$\epsilon_y = \epsilon_{4k} - \epsilon_{40}$$

1.1.4 测试及计算结果

$$A = -1.66 \times 10^{-5} \mu\epsilon \cdot \text{mm}^2 / \text{N},$$

① 收稿日期: 1996-09-13; 修回日期: 1996-12-28 王元良, 男, 68 岁, 教授

$$B = -2.66 \times 10^{-5} \mu\epsilon \cdot \text{mm}^2/\text{N}$$

$$K_1 = -0.33, K_2 = 0.22$$

2 残余应力测试及计算

2.1 试件图及应变花位置

试件图及应变花位置如图2。

2.2 测试过程

在相应的位置粘套筒架, 对中心后将应变仪调零; 钻孔, 深度2mm; 钻孔后应变仪读数稳定后记录应变 ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 。按上述步骤测1、2、3、4、0点。

2.3 计算方法

用下列公式编成计算机程序进行残余应力计算。

$$\sigma_1 = [\epsilon_1(A + B \cos \gamma) - \epsilon_3(A - B \cos \gamma)] / (4AB \cos \gamma)$$

$$\sigma_2 = [\epsilon_3(A + B \cos \gamma) - \epsilon_1(A - B \cos \gamma)] / (4AB \cos \gamma)$$

$$\gamma = \tan^{-1}[(\epsilon_1 - 2\epsilon_2 + \epsilon_3) / (\epsilon_1 - \epsilon_3)]$$

2.4 计算结果

由计算结果可得图3、4、5。其代号分别为:

数字—试件编号

G—固溶, 495~505℃淬火;

S—时效, 150~160℃;

J—机械加工;

R—热处理去应力, 150℃保温2h;

K—快速冷却;

X—冷热循环去应力, W_1 , -50~+50℃, W_2 , -100~+100℃, W_3 , -150~+150℃, 各3次。 X_1 , 1次, X_2 , 两次, X_3 , 6次, 温度变化均为-180℃~+150℃。

3 结果分析

3.1 机械加工对固溶及固溶时效试件残余应力的影响

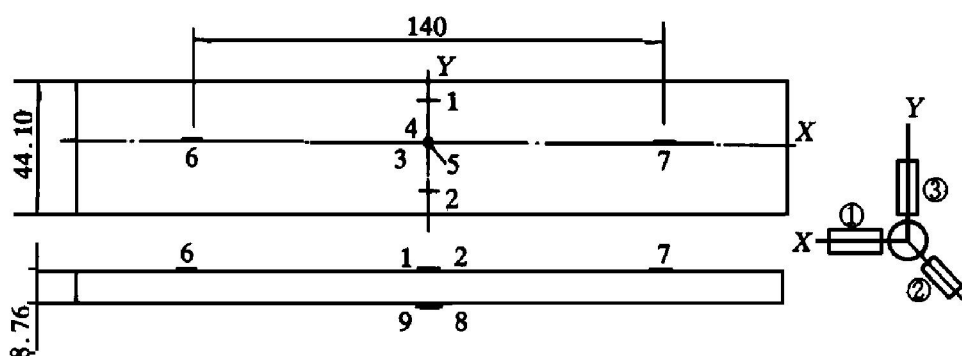


图1 标定试件及贴片

1, 2, 6, 7, 8, 9—应变片; 3, 4, 5(或相应的①, ③, ②) 其相关应变为 ϵ_3 , ϵ_4 , ϵ_5 —应变花

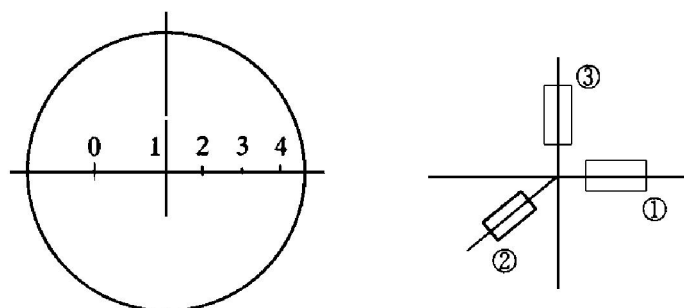


图2 LD10 铝合金残余应力测试的测点布置及贴片方位

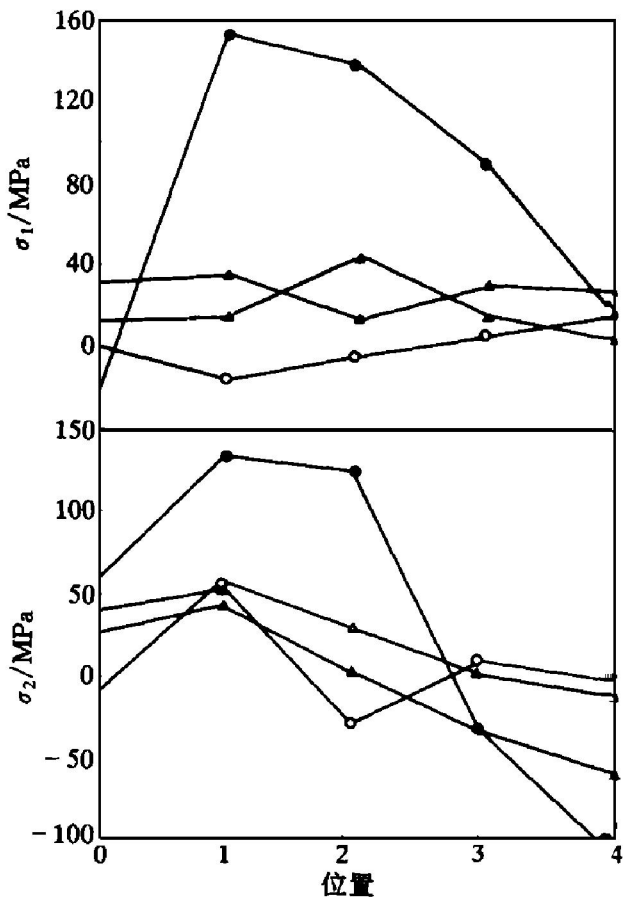


图3 机械加工对固溶及固溶时效试件残余应力的影响

●—47 GK; ○—20 GKJ; ▲—46 GKS; △—10 GKSJ

3.1.1 机械加工对固溶(快冷淬火)后残余应力的影响

由图3可看出,由于很不均匀的冷却,固溶后试件残余应力很高(47 GK),经过机械加工后,由于部分残余应力释放使应力重分布达到新的平衡而减少应力水平并均匀化(20 GKJ)。

3.1.2 机械加工对固溶时效试件残余应力的影响

由于已固溶时效处理的试件残余应力下降且分布较均匀(46 GKS),因而机械加工后残余应力变化不大而略有升高,但改善了分布的均匀程度(10 GKSJ)。

3.1.3 20 GKJ 与其 10 GKSJ 比较

两者比较,20 GKJ 加工后径向应力下降最大,但是由残余应力释放而产生的次变化也最大,会改变径向尺寸;两者切向应力差异不大。从均匀程序来比较,10 GKSJ 比 20 GKJ 要

好。因此总的比较还是以固溶时效后加工为好。

3.2 固溶时效试件机械加工后去应力处理对残余应力的影响

由图4看出,固溶时效机械加工后(GK-SJ)残余应力本来就已比较小,热处理去应力反而提高了应力水平,两种冷热循环去应力处理也未见明显的去应力效果,还在边部或中心出现个别高值。从这点看还有进一步研究的必要。

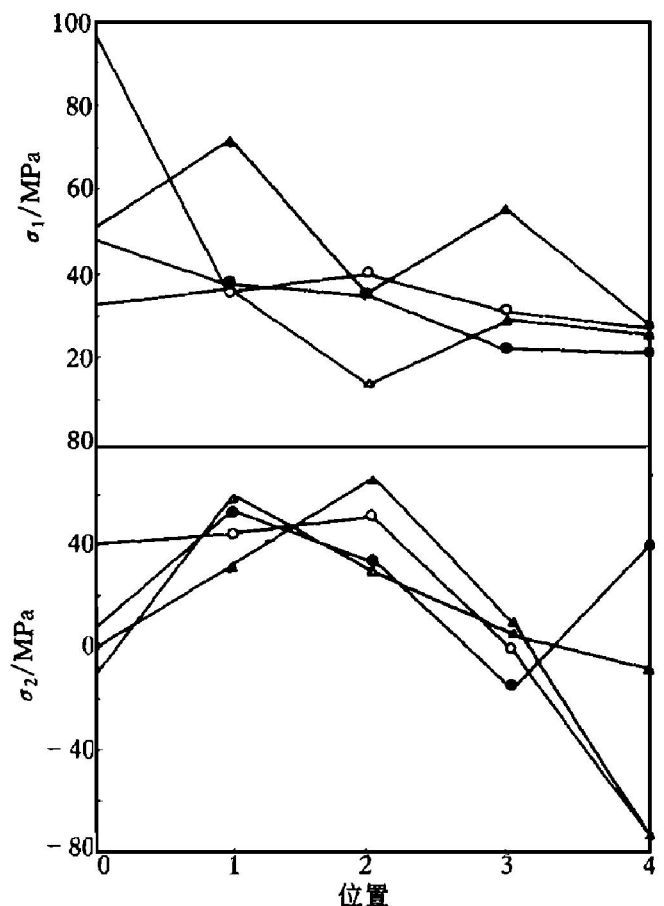


图4 固溶时效处理加工后去应力处理方法对残余应力的影响

●—13 GKJX; ○—12 GKSJX; ▲—11 KSJR; △—10 GKSJ

3.3 固溶时效及加工后去应力处理工艺对残余应力的影响

由图5、6可分析固溶时效及加工后去应力处理工艺对残余应力的影响。

3.3.1 变更循环温度的影响

图5中 W_1 、 W_2 、 W_3 为变温范围由小到大的次序(2.4节中已说明),由图看出变更循环

温度的冷热循环处理降低了固溶时效加工后的应力水平, 变温范围的大小影响不是很明显, 而且 W_3 出现高值点 (σ_1 为 150.1 MPa, σ_2 为 59.4 MPa, 图中略去了此点)。如果不计这个高值点则以 W_3 为最好。

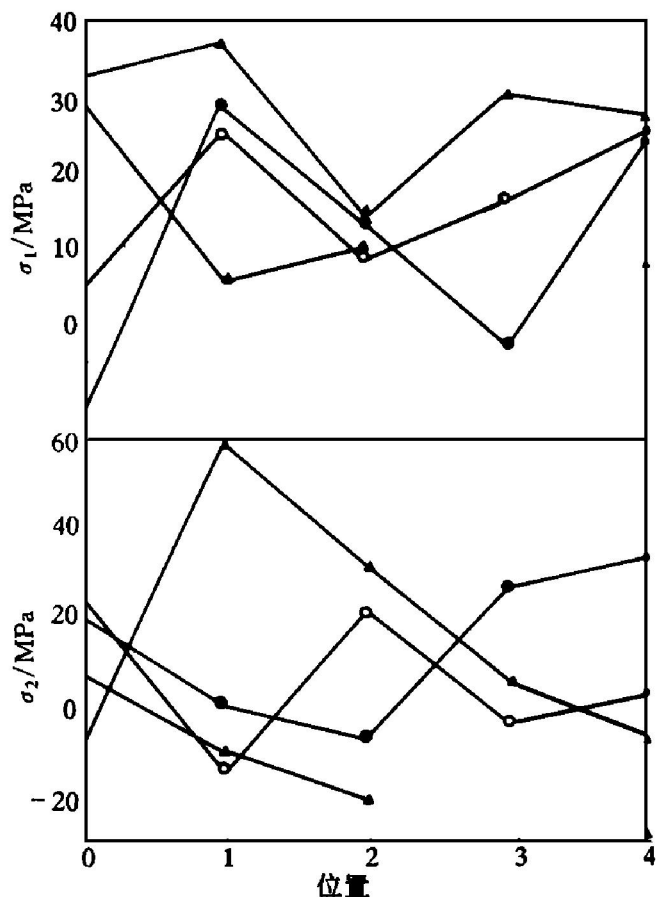


图5 固溶时效加工后变温范围对残余应力的影响

● -21QSJXW₁; ○ -22QSJXW₂;
▲ -23QSJXW₃; △ -10QSJ

3.3.2 变更循环次数的影响

图6中 X_1 、 X_2 、 X_3 为 $-180^\circ\text{C} \sim +150^\circ\text{C}$ 分别循环1次、2次、6次的冷热循环热处理工艺, 由图看出, 循环次数增加, 应力水平降低越多, 分布越均匀, 以循环6次的 X_3 效果最好。其效果明显优于变更循环温度的冷热循环处理。

总的说来, 一般固溶时效本身就有去应力的作用, 加工以后又有应力重分布和使残余应力降低和均匀化的作用, 原始应力大, 分布越不均匀, 其效果越显著; 由于固溶时效本身去应力的作用和加工以后的去应力作用, 本身残

余应力水平就比较低, 因此一般的去应力处理效果很小, 甚至适得其反。如果没有更高的要求, 对固溶时效的铝合金至少在轴对称机械加工的情况下可以免去后续去应力处理; 如果要求很高, 采用6次循环去应力效果最佳。

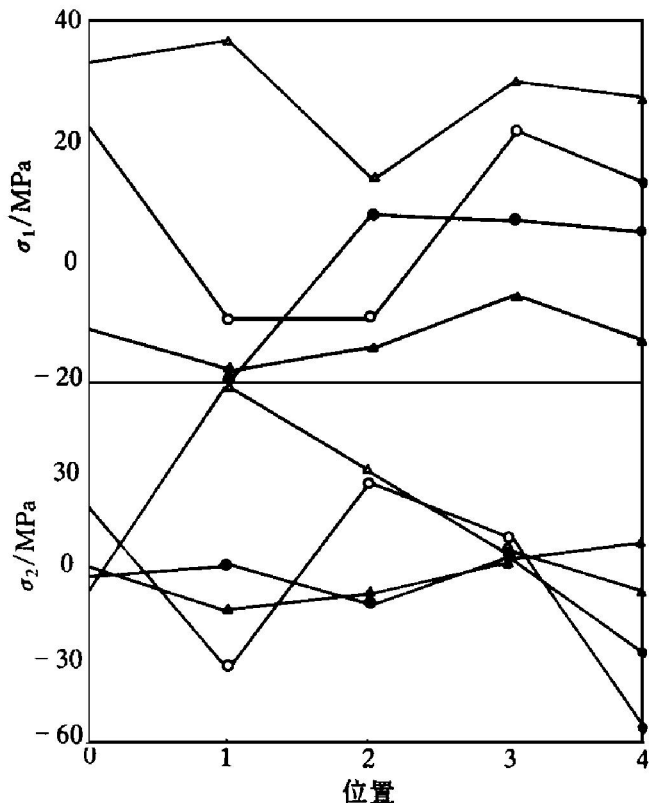


图6 固溶时效及加工后 $-180^\circ\text{C} \sim +150^\circ\text{C}$ 循环处理次数对残余应力的影响

● -31QSJX₁; ○ -32QSJX₂; ▲ -33QSJX₃; △ -10QSJ

4 结论

(1) 淬火快冷后试件有很高的热应力, 加工以后使应力重新分布和使残余应力降低或均匀化; 原始应力越大分布越不均匀, 其效果越显著。

(2) 由于固溶后时效和机械加工本身有去应力作用, 试件残余应力就比较低, 因此冷热循环去应力处理效果很小, 甚至有可能适得其反, 如果没有更高的要求, 对固溶时效的铝合金至少在轴对称机械加工的情况下, 可以免去后续去应力处理。

(3) 如果需要进一步去应力处理, 变温循

环处理效果不佳, 采用 6 次循环去应力工艺效果最好。

参考文献

1 Koichi Masuchi. Analysis of Welded Structure. Oxford

Pergamon Press, 1980.

2 唐慕尧主编. 焊接测试技术. 北京: 机械工业出版社, 1988: 185- 194.

3 安运铮编. 热处理工艺学. 北京: 机械工业出版社, 1983.

4 轻金属材料手册编写组. 轻金属材料手册. 北京: 冶金工业出版社, 1979.

TEST AND ANALYSIS OF RESIDUAL STRESS OF ALLOY ALUMINIUM LD10

Wang Yuanliang, Cheng Mingming

Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031

ABSTRACT The test of residual stress of stress-relief treatment after machining with the small hole releasing way was carried out and the effect of different heat-treated and stress-relief technique after machining on residual stress was analyzed. The results indicated that after machining the stress is re-arranged and the residual stress decreases; the effect of thermal cycle stress-relief treatment is little.

Key words alloy-aluminium machining stress-relief treatment residual stress

(编辑 黄劲松)