

振动时效应力消除可靠性探讨

徐练光 吴本兴 杨 涛 高源传崎 刘 川 梁多铭

(四川航天燎原科技有限公司, 成都 610100)



摘要: 通过分析热处理与振动时效消除应力的原理, 开展了对同一试验件在初始状态、振动时效后和热处理后三种状态下的对比试验, 检测了三种应力消除方式试验后具体应力值, 得出三种消除应力方式的应力消除率, 验证了振动消除应力在零件加工中的消除应力和控制零件变形的有效性。

关键词: 振动时效; 残余应力; 应力消除率

The Reliability Discussion of Vibrating Stress Relief

Xu Lianguang Wu Benxing Yang Tao Gao Yuanchuanqi Liu Chuan Liang Duoming

(Sichuan Aerospace Liaoyuan Science and Technology Co., Ltd., Chengdu 610100)

Abstract: By analyzing the principle of stress relief by heat treatment and vibration stress relief, the comparative tests of the same test piece under three states of initial state, vibration stress relief and heat treatment are carried out. The specific stress values of three stress relief methods after test are tested, and the stress relief rates of three stress relief methods are obtained, which verify the elimination of stress in part processing and effectiveness of controlling part deformation by vibration stress relief.

Key words: vibrating stress relief; stress relief rate; residual stress

1 引言

铝合金材料具有密度小、强度高、导电导热性好及易加工等特点, 目前已广泛运用于航天产品零部件中。但硬铝合金在切削加工时机械加工应力较大, 导致零件加工后变形大。我公司承制的航天产品中, 70%以上采用 2A12 硬铝合金材料, 在加工过程中产生应力大, 变形严重, 需要经过时效消减应力和校形, 才能保证尺寸要求。目前, 主要通过热处理方式消除零件在机械加工过程中产生的应力, 但热处理耗时较多且需要跨车间, 导致零件的生产进度往往不能满足生产周期要求, 且热处理并不能充分消除应力, 产品质量难以保证。因此寻求另外一种消除应力方式作为热处理方式的补充或部分替代成为必然。

振动时效设备主要包括减震器、控制器、传感器和振动平台等, 如图 1 所示。工作时将工件安装于振动平台上, 在工件的各个方向安装传感器, 再通过控制激振器产生激振频率。利用传感器反馈的数据, 选择使工件发生共振的频率, 让工件随振动平台振动, 使工件内部组织产生微观变化, 从而使工件内部应力得到降低, 最终保证产品的尺寸稳定性。



图 1 振动时效设备

2 振动时效的工作原理

作者简介: 徐练光 (1988), 工程师, 机械专业; 研究方向: 机加工工艺。

收稿日期: 2019-09-09

3 振动消除应力工艺试验过程

3.1 试验方案及试验流程

由于零件之间存在个体差异，为了更好地对比各种失效应力后零件残余应力的变化，采用 X 射线衍射法检测并记录。设计典型结构，对同一零件的相同部位在不消除应力、振动时效消除应力和热处理消除应力三种处理后检测残余应力，分析检测数据，评价振动时效消除应力的具体效果。工艺试验方案流程如图 2 所示。

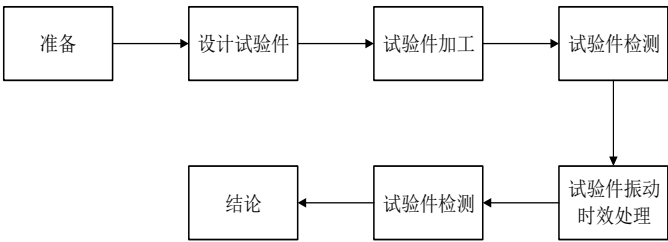


图 2 工艺试验方案总流程

3.2 工艺试验方案实施

3.2.1 试件的制作

依据航天产品的特点，选择变形大的硬铝铝合金作为此次试验材料，并设计制作试验件。材料：铝板 2A12-T1；规格： $\delta 45\text{mm} \times 205\text{mm} \times 205\text{mm}$ ；数量：4 件，结构见图 3。

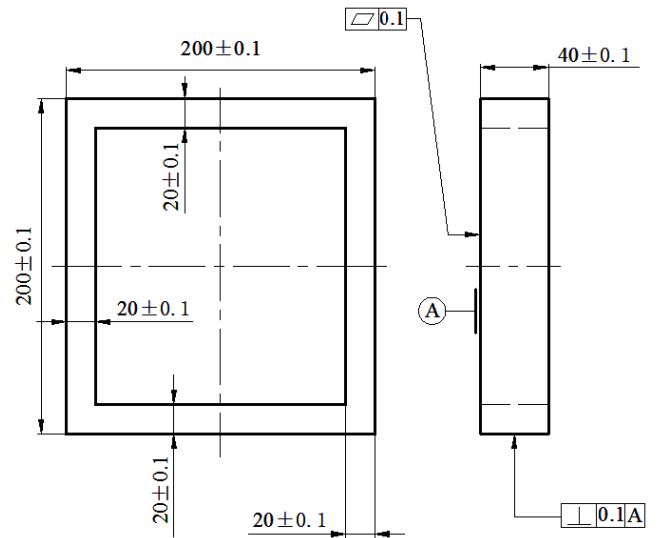


图 3 试验件结构图

3.2.2 试件的加工及检测流程

为尽可能地确保试验数据的有效性，此次试验的 4 件试验件为同一批次加工，加工工艺流程及参数等均

相同。对同一零件的相同部位在不消除应力、振动时效消除应力和热处理消除应力三种处理后检测残余应力，取试验件 4 件，试验工艺流程为：铣外形→淬火（将零件材料由 T1 状态改成 T4 状态）→铣内腔→线切割清根→在指定的 2 块区域标记位置用 X 射线衍射法检测残余应力值并记录→振动时效→在指定的 2 块区域标记位置用 X 射线衍射法检测残余应力值并记录→热处理→在指定的 2 块区域标记位置用 X 射线衍射法检测残余应力值并记录。

试件及检测具体位置分别见图 4、图 5。



图 4 试件

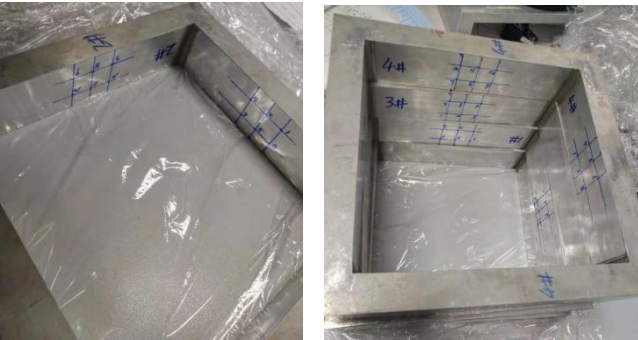


图 5 试样测点位置

3.2.3 检测参数

采用 X 射线衍射法检测残余应力，检测参数见表 1。

表1 X射线应力测试仪检测参数（Cr靶）

检测方法	侧倾固定 $\Psi 0$ 法	管电压/kV	25
辐射	CoK α	管电流/mA	4
衍射晶面	331	定峰方法	Pearson VII
衍射角	148.900	圆孔直径/mm	2
2 θ 扫描范围	1200~1600	曝光时间/s	2
滤波片	V	应力常数	-125.2MPa/deg

3.3 振动时效残余应力的影响试验结果

3.3.1 振动时效残余应力检测数据

振动时效前后的残余应力测试结果见表 2~表 5，

其中正值代表残余拉应力，负值代表残余压应力。应力消除率的计算方法为：

应力消除率 =
$$\frac{\text{振动时效前的应力绝对值}-\text{振动时效后的应力绝对值}}{\text{振动时效前的应力绝对值}} \times 100\%$$

(1)

表2 1#铝板表面残余应力测试结果 MPa

试样 编号	1#试样				
测点 编号	初始 状态	振动时 效态	热处 理态	振动时效应力 消除率/%	热处理应力 消除率/%
1	-123.6	-98.1	65.6	20.6	46.9
2	-40.7	29.5	50.62	27.5	-24.4
3	-37.4	30.2	38.63	19.3	-3.3
4	-45.5	-11.3	30.07	75.2	33.9
5	-126.6	-56.4	93.25	55.5	26.3
6	-52.5	-7.9	80.26	84.9	-52.9
7	-46.1	-21.4	17.89	53.6	61.2
8	-37.4	-17.3	13.18	53.7	64.8
9	-114.3	-90.2	40.21	21.1	64.8
10	-34.9	-32.1	32.17	8.0	7.8
11	-83.0	-77.3	51.52	6.9	37.9
12	-68.3	-32.1	30.03	53.0	56.0
平均应力消除率/%				39.9	26.6

表4 3#铝板表面残余应力测试结果 MPa

试样 编号	3#试样				
测点 编号	初始 状态	振动时 效态	热处 理态	振动时效应力 消除率/%	热处理应力 消除率/%
1	-50.9	32.1	70.21	36.9	-37.9
2	-44.9	-10.1	43.17	77.5	3.9
3	-215.3	-158.3	106.41	26.5	50.6
4	67.0	72.1	55.14	-7.6	17.7
5	106.9	102.1	27.62	4.5	74.2
6	192.1	89.2	40.14	53.6	79.1
7	-40.1	12	25.19	70.1	37.2
8	-154.2	-132.1	78.16	14.3	49.3
9	-182.4	-142.3	104.23	22.0	42.9
10	-41.8	13.2	13.15	68.4	68.5
11	47.5	-27.1	54.61	42.9	-15.00
12	49.6	18.9	67.14	61.9	-35.4
平均应力消除率/%				39.3	27.9

表3 2#铝板表面残余应力测试结果 MPa

试样 编号	2#试样				
测点 编号	初始 状态	振动时 效态	热处 理态	振动时效应力 消除率/%	热处理应力 消除率/%
1	48.8	22.1	40.15	54.7	17.7
2	-52.4	-44.3	24.62	15.5	53.0
3	46.6	20.4	13.21	56.2	71.7
4	-141.3	-89.2	90.62	36.9	35.9
5	37.9	10.9	30.47	71.2	19.6
6	-154.4	-121.1	100.3	21.6	35.0
7	44.4	10.3	46.12	76.8	-3.9
8	74.1	64.2	90.73	13.4	-22.4
9	-82.4	-85.4	43.21	-3.6	52.4
10	73.4	23.1	50.42	68.5	31.3
11	-124.8	-101.4	76.16	18.8	39.0
12	51.3	12.3	58.81	76.0	-14.6
平均应力消除率/%				42.2	26.2

表5 4#铝板表面残余应力测试结果 MPa

试样 编号	4#试样				
测点 编号	初始 状态	振动时 效态	热处 理态	振动时效应力 消除率/%	热处理应力 消除率/%
1	-77.8	-56.3	51.4	27.6	33.9
2	62.8	33.2	50.6	47.1	19.4
3	-171.1	-103.1	74.17	39.7	56.7
4	-52.8	-32.1	40.62	39.2	23.1
5	-50.2	21.2	23.96	57.8	52.3
6	38.4	18.9	40.5	50.8	-5.5
7	-62.8	-42.1	24.3	33.0	61.3
8	39.1	28.9	26.8	26.1	31.5
9	33.2	-13.2	38.4	60.2	-15.7
10	-41.5	-21.3	-50.7	48.7	-22.2
11	-95.3	-83.1	70.44	12.8	26.1
12	-63.7	12.1	25.4	81.0	60.1
平均应力消除率/%				43.7	26.8

如表 2～表 5 所示的振动时效前后残余应力检测

结果转换为曲线图如图 6～图 9 所示。

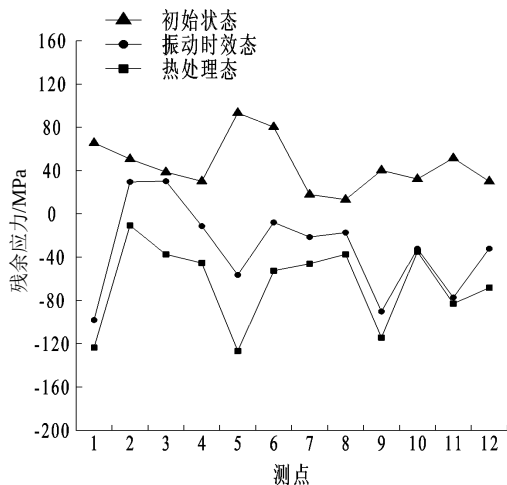


图6 1#试样曲线图

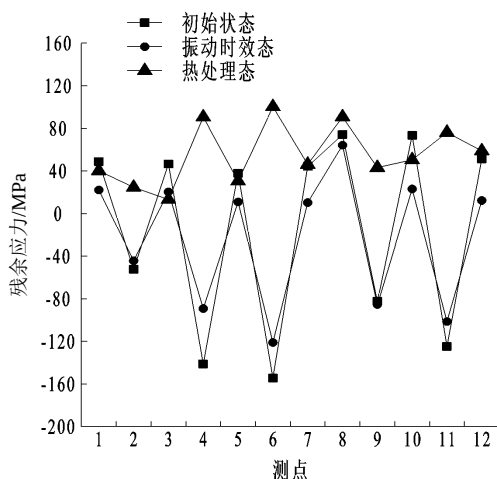


图7 2#试样曲线图

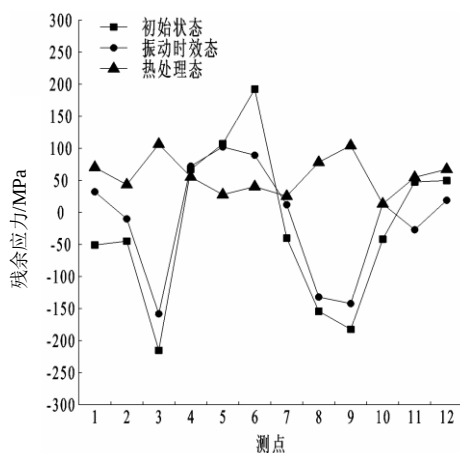


图8 3#试样曲线图

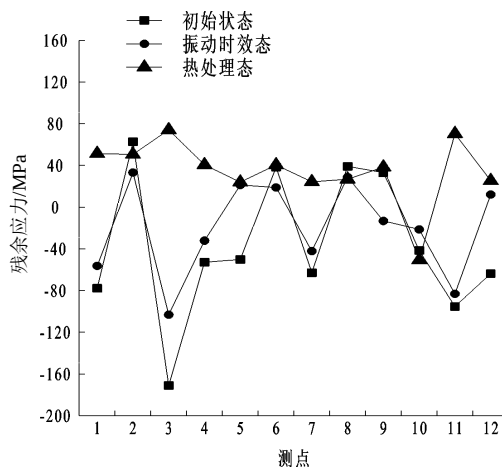


图9 4#试样曲线图

3.3.3 试验结果分析

表2~表5、图6~图9的残余应力测试结果表明:

a. 经过振动时效处理后, 相对于原始状态, 2A12-T4 铝板表面残余应力整体有一定程度的降低, 应力的总体水平相对于振动时效处理前更趋于均匀化, 说明振动时效工艺起到了一定程度消除铝板应力的作用;

b. 1#试样振动时效平均应力消除率为 39.9%, 2#试样振动时效平均应力消除率为 42.2%, 3#试样振动时效平均应力消除率为 39.3%, 4#试样振动时效平均应力消除率为 43.7%;

c. 经过振动时效+热处理后, 相对于原始状态, 2A12-T4 铝板表面残余应力整体分布变得更为均匀, 基本上为拉应力, 应力绝对值峰值降低。1#~4#试样热处理态平均应力消除率分别为 26.6%、26.2%、27.9% 和 26.8%;

d. 对比振动时效和振动时效+热处理的应力测试

结果可以发现, 振动时效态的平均应力消除率要高于振动时效+热处理态。

4 结束语

经过振动时效应力消除情况工艺试验, 并结合 X 射线衍射法检测试验件具体的应力值, 摸清了振动时效具体的应力消除水平。本次试验还发现经振动时效后试验件的应力消除率相对于热处理状态时更高, 可以采用振动时效替代常规的热处理时效消除应力工艺。另外, 如果采用振动时效与热处理时效相结合的方式消除应力, 工件应力的总体水平将更趋于均匀化, 有利于产品的尺寸稳定。

参考文献

- 1 汤小牛, 刘久明. 振动时效[M]. 济南: 机械工业部济南铸造锻压机械研究所, 1999