

LD₂ 锻铝稳定化处理的研究

黄 辉

摘要: 本文采用光镜、电子显微镜、X射线衍射仪、X射线应力分析仪及测定机械性能的方法对工业锻铝合金LD₂的固溶处理、时效和稳定化处理对组织、性能、应力及尺寸稳定性的影响进行了试验研究。研究认为在获得较好综合机械性能的情况下,控制固溶化条件、淬火介质温度、时效温度及时间和冷热循环稳定化处理条件,可以稳定组织,减少残余应力,满足尺寸稳定性的要求。从而提出了适合于精密机械与仪器中高尺寸稳定性的零件的最佳工艺规程

一、前 言

制造高精度的仪器时,要求结构材料具有足够高的尺寸稳定性,低而稳定的线膨胀系数和高的导热率。变形铝合金具有这些优异的综合物理机械性能,在仪器制造和精密机械制造业中得到了广泛的应用。

变形铝合金用于陀螺仪、大型望远镜的重要零件。还必须进行正确的材料选择和采用合理的稳定化处理工艺。

本文研究作为大型光学仪器中金属反射镜用LD₂锻铝合金的热处理与尺寸稳定性的关系;提出了适用于高精度、高尺寸稳定性要求的精密仪器零件稳定化处理工艺和尺寸稳定性测试方法。

二、试 验 条 件

1. 试验用材料的化学成分,见表1。

表1 材料化学成分 (%)

材 料	Cu	Mg	Mn	Si	Al
标准材料	0.2—0.6	0.45—0.9	0.15—0.35	0.5—1.2	余 量
试验材料	0.52	0.72	0.24	0.99	余 量

LD₂合金在Al—Mg₂Si伪二元共晶状态图中的位置如图1所示。

2. 试验用设备

加热采用JT—35型循环鼓风机和恒温干燥箱;冷处理采用盛液态氮的小型杜瓦容器。

残余应力测定采用MSF—2903型应力仪,连续扫描 $\sin^2\varphi$ 法半高宽定峰法。尺寸测量在光学计上进行。

3. 试样规格

- 1) 机械性能试样为标准圆柱形试样 $\phi 10 \times 100$;
- 2) 金相、硬度试样为 $\phi 16 \times 20$;
- 3) 尺寸稳定性试样为 $\phi 16 \times 100$ 。

三、试验内容及结果分析

1. 热处理与机械性能

全部试样与零件毛坯经锻造成型后均经 320°C 4 小时退火处理。然后进行固溶处理，淬火冷却采用两种温度 (15°C 和 65°C) 水冷，时效温度为 165°C ，时效时间与冷却介质对机械性能影响结果如图 2、图 3 所示。

在图 2 中两种温度淬火后硬度差值最大为 $HR_B 3$ ，当时效 20 小时，这个差值就只有 $HR_B 2$ 。在 65°C 水中淬火 σ_s 为 37.5 kgf/mm^2 ， δ 为 14.0% ； 15°C 水中淬火 σ_s 为 38.3 kgf/mm^2 ， δ 为 13.9% 。当水温超过 70°C 以后，就会使强度值明显下降。

影响铝合金尺寸稳定性受三个因素控制：

- 1) 在热处理过程中温度的变化；
- 2) 热处理和机械加工过程中微观组织的变化；
- 3) 各种加工过程中施加给零件的残余应力。

在铝合金热处理时残余应力的最主要来源是淬火过程。固溶加热是在高温时进行，当零件被急速冷却时产生热应力，因此淬火冷却剂的冷却能力愈强所形成的残余应力亦愈大。当选择铝合金的淬火参数时必须考虑合金的机械性能和机械加工要求。在保证性能前提下尽量采用冷却能力较缓的冷却介质，以保证最小的残余应力和高的尺寸稳定性。试验结果表明，用 65°C 热水淬火足以使溶质不从过饱和的基体固溶体中析出。

图 3 中可看出， LD_2 合金淬火之后立即进行 165°C 时效，随着时效时间延长，硬度、强度值明显提高，塑性值下降。当时效时间超过 10 小时后强度无明显增加，硬度仍继续增加，塑性缓慢下降。当合金时效时间为 20 小时，仍未出现硬度下降趋势。

2. 热处理与组织变化

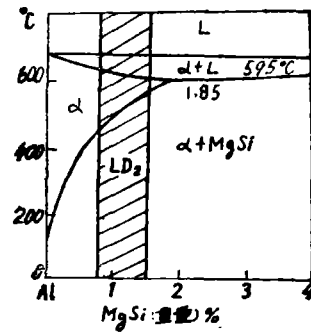


图 1 Al— Mg_2Si 的二元状态图

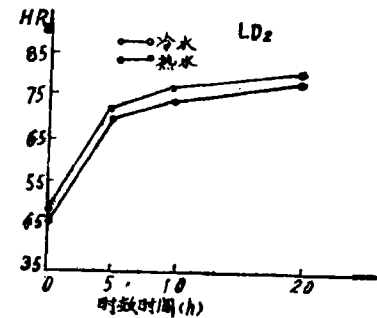


图 2 冷却水温度对淬火时效后硬度的影响

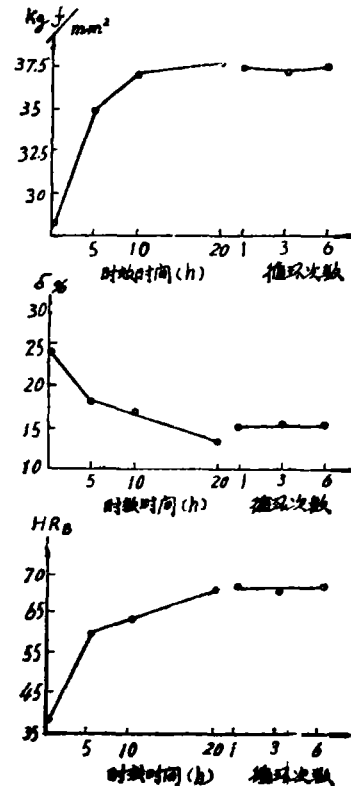


图 3 时效时间、冷热水循环次数对 LD_2 机械性能的影响 (热水淬火)

图4—图9分别为LD₂合金锻造后退火、淬火，淬火后短时间时效、长时间时效、多次冷热循环及淬火后经长时间自然时效的透射电子显微组织。合金加热至单相区并保温充分的时间，以便使第二相β和Q溶解并使溶质原子在固溶体中为无序分布。在淬火冷却时，形成了过饱和固溶体，当进行人工时效时，由于在时效温度下，溶质原子开始扩散，并以极大的速度产生偏聚形成了G—P区，由于G—P区是与基体共格的，当它们形成时合金变得较硬。在时效过程继续进行形成了中间沉淀物β'有序区，此时中间相与基体共格，在这种情况下出现硬度的进一步增加。从图3可以看出LD₂合金在本试验所进行的淬火、时效和多次冷热循环之后没有出现硬度和强度的下降，即使是合金在淬火后20小时时效，再经六次冷热循环处理亦未出现硬度值下降。因此可以得出结论，LD₂合金在本试验的淬火、时效和多次冷热循环处理之后，出现溶质原子的偏聚区、与基体共格的过渡相和弥散分布的第二相。从电子显微组织中可看出有面心立方结构的Mg₂Si及体心立方结构的Q相析出，从X射线衍射结果图10中可以得出相同的结果。

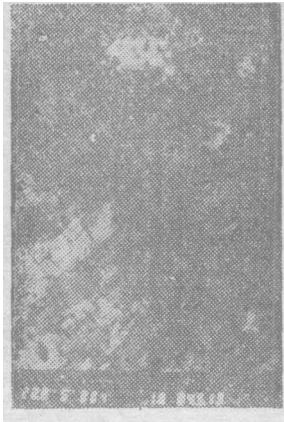


图4 LD₂合金320℃，4小时退火
透射电子显微组织×20000

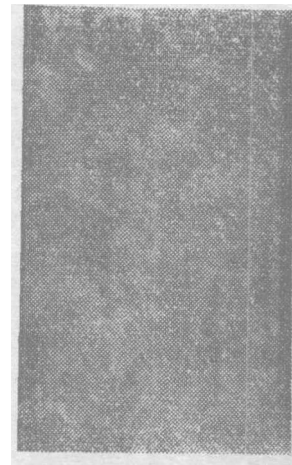
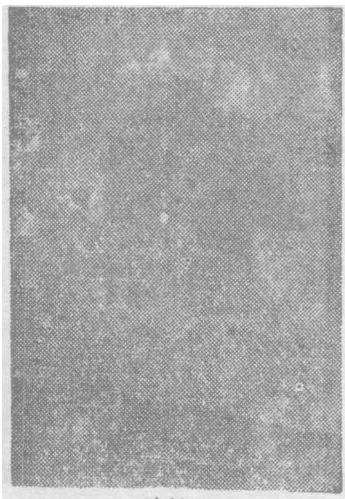
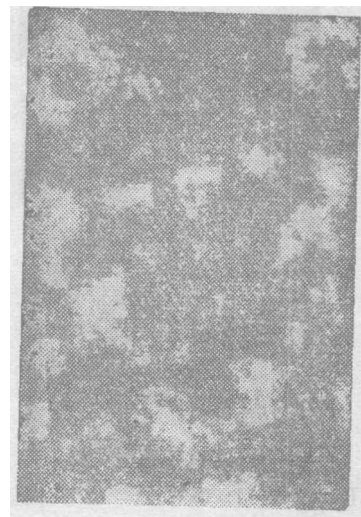


图5 LD₂合金525℃ 65℃水淬透射电子显微
组织 ×30000



a 暗场



b 明场

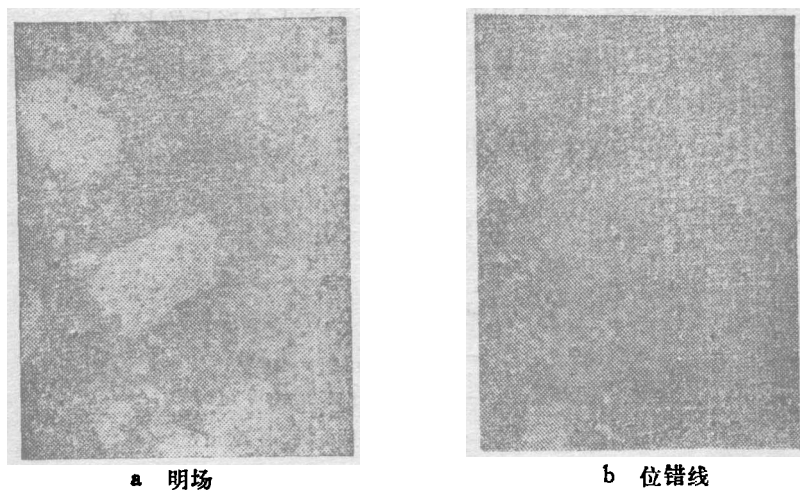


图8 LD₂ 525℃ 65℃水淬自然时效二年透射电子显微组织 ×10000

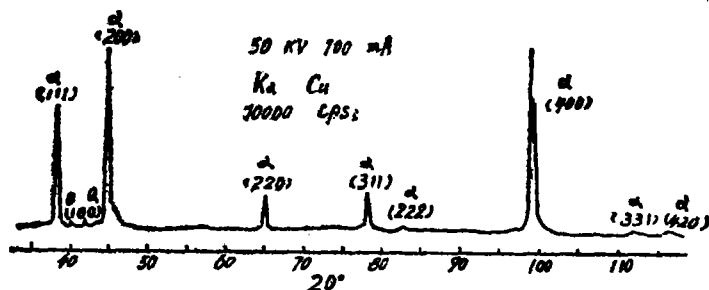


图9 LD₂ 合金 525℃, 65℃水淬165℃时效20小时六次冷热循环的X射线衍射图象

图7为未经冷热循环处理的长时间时效组织。从图中可观察到，在析出相周围是不规则的应变区，而图8中经图7试样同样处理再进行六次冷热循环处理后使析出相周围的应变区趋于规则的形状，这可能就是冷热循环处理导致材料稳定性高的原因之一。

图9为淬火后经二年自然时效的电子显微组织，从图中可看到在长时间自然时效后也形成了与人工时效过程中相似的析出相。除此之外，在图9中可看到少量平直的位错线。

铝合金的时效过程是松弛内应力和稳定合金组织的最适用的方法之一。对于精密机械与仪器零件即使是很小的内应力都会给零件带来不稳定性，因此为了更进一步稳定组织和消除内应力，采用冷热循环稳定化处理工艺。工艺如下：将淬火时效处理后的试样在-90℃以下的液氮蒸气中保温1—2小时，然后取出立即放入已恒温的干燥箱中保温1—2小时，此过程为一次冷热循环，然后按上述规程重复进行多次。

3. 热处理与残余应力、尺寸稳定性

为了测定热处理过程中及稳定化处理对材料残余应力及尺寸稳定性的影响，做如下试验：

- 1) 将退火试样坯加工成 $\phi 32 \times 100$ mm，端面不平度小于0.005mm，端面光洁度达 $\nabla 7$ 以上，测量精加工后长度；
- 2) 将精加工后的试样进行固溶处理2小时保温，在室温(15℃)和65℃水中淬火，并测

量其长度，

3) 将试样车削去 $\frac{1}{2}$ 直径，测量因内应力释放而产生变形后的长度，

4) 将试样时效12小时后测量其长度，再时效 8 小时测量其长度，然后将上述试样进行冷热循环处理并测量长度，

5) 按下列公式计算出淬火，时效和冷热循环处理后的残余应力。

$$\sigma_{\text{淬火}} = E \frac{L_1 - L_2}{L_1} \quad \sigma - \text{残余应力 } \text{kgf/mm}^2$$

E —弹性模量 7325kgf/mm²

L_1 —淬火后试样长度 mm

L_2 —1/2d之后试样长度mm

L_n —经各种处理后的长度mm

$$\sigma_{\text{稳定}} = E \frac{L_2 - L_n}{L_2}$$

把经过上述处理、加工后测量的长度结果和计算后的残余应力结果列于表 2。

LD₂合金在固溶处理时由于溶质原子都溶于溶剂内，由于Cu、Si对铝中固溶体点阵常数和比容都有减少趋势，而Mg却反之，因此在形成过饱和固溶体之后对固溶体点阵常数及比容的影响将取决于所有溶质元素共同作用的结果。纯铝比容为0.3706，Mg₂Si (β相) 比容为0.5025，Q相比容为3.115。因此可以看到合金在淬火冷却之后其长度都有明显增大，当时效过程中有β相和Q相析出时长度缩短，经过几次冷热循环之后尺寸趋于稳定，长度值变化很小。应力值也有类似结果。不管进行如何处理之后，冷水淬火比热水淬火的应力都大。因此在满足机械性能要求的前提下，为保证尺寸稳定性要求，尽量采用热水淬火。

表 2 热处理工艺对LD₂尺寸，应力的影响

序号	处理工艺	试验结果 (15℃水淬)		试验结果 (65℃水淬)	
		尺寸 mm	应力kgf/mm ²	尺寸 mm	应力kgf/mm ²
1	精机械加工后	99.9350		99.9380	
2	淬火后	99.9670	6.70	99.9690	3.78
3	车削:1/2 d后	99.8900		99.9255	
4	165℃时效12小时	99.8992	0.89	99.9340	0.74
5	165℃时效20小时	99.8965	0.57	99.9295	0.35
6	一次冷热循环	99.8950	0.44	99.9290	0.30
7	二次冷热循环	99.8945	0.40	99.9290	0.30
8	三次冷热循环	99.8940	0.35	99.9290	0.30
9	四次冷热循环	99.8940	0.35	99.9290	0.30
10	五次冷热循环	99.8940	0.35	99.9290	0.30
11	六次冷热循环	99.8930	0.26	99.9280	0.22
12	七次冷热循环	99.8930	0.26	99.9280	0.22

4. 筒形零件的应力测试结果

根据上面的试验数据，筒形零件进行了如表 3 之处理，并进行X射线应力测定。由表 3 看出，经淬火与20小时时效并再进行六次冷热循环处理后残余应力值很小。

表3 X射线应力测定结果

序 号	处 理 工 艺	残余应力 kgf/mm ²	
		轴 向	切 向
1	320℃ 4小时退火	-1.4	-1.1
2	525℃淬火, 165℃时效20小时	-2.4	-0.6
3	序号2 + 六次冷热循环	-1.1	-0.2

表4 两个典型零件的测试结果

零件名称	尺 寸 mm				
	淬火时效20小时	四次循环	五次循环	六次循环	放置半年
双 曲 镜	φ 209.7886	φ 209.6655	φ 209.6690	φ 209.6705	φ 209.6690
抛 物 镜	φ 231.4056	φ 231.2760	φ 231.2840	φ 231.2790	φ 231.2810

对经过加工处理的两个典型零件进行了测定。两个外径分别为 $\phi 209$ 、 $\phi 231$ 壁厚为10mm的反射镜在淬火时效20小时及4—6次冷热循环处理后的尺寸变化列于表4。在现有的测试条件下,可以看出零件在淬火时效后的尺寸值与经过若干次冷热循环后的尺寸值差值较大,因此对高精度、高尺寸稳定性要求的铝合金零件必须再进行超过四次冷热循环来稳定组织和减少残余应力从而满足零件高尺寸稳定性要求。

四、结 论

1. 残余应力大小与组织稳定程度是衡量金属及合金稳定性的标志。除冷加工的因素之外,合金固溶加热与时效温度、保温时间、淬火冷却剂冷却能力及冷热循环次数是影响尺寸稳定性的决定因素。

2. 对于精密机械与仪器中高精度、高尺寸稳定性要求的零件如反射镜等建议选用LD₂锻铝,并选用所推荐的长时间时效,热水淬火,多次冷热循环工艺。

参 考 文 献

- [1] The measurement of dimensional stability of Invar using strain-gage techniques 1976.8.9.
- [2] H.Y.Hunsicker, «Dimensional changes in heat treating aluminum alloys», Metallurgical Transactions, 1980, Vol.11A No 5 759—772.
- [3] T.Croucner and D. Butler, «How to achieve dimensional stability in aluminum alloys» Heat treating, 1980, September.
- [4] T.Croucner and D. Butler, Quenching major stress source in treated, 1980, October.
- [5] 李树棠, 金属X射线衍射与电子显微分析技术, 冶金出版社

Study on the Stabilizing of Forging Aluminium LD₂

Huang Hui

Abstract

This paper deals with the influence of solution treatment, ageing and stabilizing process on the structures, properties, stresses and dimensional stability of commercial forging aluminium LD₂ by means of metalloscope, electron microscope, x-ray diffractometer, x-ray stress analyzer and method for the determination of mechanical properties. The experimental results suggested that under certain circumstances a good strengthening and toughening effect can be obtained. By controlling the conditions of solution treatment, quenching temperature, ageing temperature, ageing time and conditions of cold-heat cyclic stabilizing it may stabilize structures, reduce the residual stresses and meet the need of dimensional stability of parts required high dimensional stability in fine machine and fine instrument.