

# 变形铝合金零件热处理状态的涡流电导率-布氏硬度法检验

国营庆安宇航设备公司 孙建武

**【摘要】** 在将电导率和硬度两者结合起来,应用于变形铝合金热处理状态确定理论分析的基础上,用数理统计方法之一——t检验法,分别对Ly12合金在自然时效稳定态下,对应于一定置信水平的电导率和硬度值进行了估算。所得结果,为实际检测中的应用,提出了直接的判断依据。

**关键词:** 变形铝合金 电导率 布氏硬度

## INSPECTION OF DEFORMED ALUMINUM ALLOY PARTS DURING HEAT-TREATMENT BY EDDY CURRENT ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND BRINELL HARDNESS MEASUREMENT

Sun Jianwu

(Qingan Aerospace Equipment Corporation)

**【Abstract】** The conductivity and hardness of Ly12 alloy in natural ageing stable condition were estimated corresponding with the level of confidence by means of mathematical statistics——t inspection method. The results can be regarded as direct judgement criterion for practical inspection.

有关变形铝合金热处理状态下的显微组织、机械性能和电导率之间关系的研究,国外已有所报道<sup>[1,2]</sup>。由于电导率检验具有方便、无损、灵敏等优点,因此将其和硬度结合起来,应用于变形铝合金热处理状态的确定,有着日趋广泛的发展势头,且不少国家已制定了检验标准。但在国内,这项工作的开展尚不充分。国产各种牌号铝合金在不同热处理状态下电导率和硬度验收极限值无标准可循。在研究方法上,就所见文献看,仍停留在按有关技术条件所要求的布氏硬度下限值代入回归直线方程,求电导率的置信区间值,达到以电导率检查代替硬度检查,从而确定热处理状态的阶段。实践证明,这种方法仅适用于电导率和硬度之间具有单值对应时的情况,可应用的范围是有限的。

本研究工作的目的是试图在国内外已有研究成果的基础上,结合航空某产品实际检测需要,探索确定国产变形铝合金零件热处理状态新方法——涡流电导率-布氏硬度法的应用方法及途径。

### 1 试验内容

#### 1.1 试验用原材料

两批材料均采用 $\phi 35\text{mm}$ 的轧制棒材。化学成分见表1。

#### 1.2 试样制备

电导率试块沿材料流线方向加工成 $31\text{mm}\times 30$

表1 试样用原材料化学成分

批号	元素及含量(%)				
	Cu	Mn	Mg	Fe	Si
1	4.17	0.59	1.42	0.10	0.42
2	3.82	0.78	1.42	0.15	0.40

$\text{mm}\times 10\text{mm}$ 方块。其 $31\text{mm}\times 30\text{mm}$ 两主表面粗糙度要求不低于 $Ra 6.3\mu\text{m}$ 。硬度在同一电导率试块的另一主表面上测试。光学金相试样为 $\phi 10\text{mm}\times 15\text{mm}$ 圆柱体。

#### 1.3 热处理工艺

试样热处理在长度大于 $4\text{m}$ 的硝盐槽中进行。炉温采用自动控温仪控制。试样放在热电偶附近,并用直流电子电位差计监测温度波动。控温精度可达 $\pm 0.5\sim 1^\circ\text{C}$ 。盐液成分符合HB/Z5126-76有关规定。用水作淬火液,保留时间为 $20\text{min}$ ,且淬火后水温低于 $40^\circ\text{C}$ 。

#### 1.4 电导率及硬度测试

电导率测试用FQR7501型涡流电导仪。测试过程按HB 5356-86标准进行。布氏硬度测试采用HPO250硬度计,试验条件为HB7.5/6.25/30。每块试样的电导率取三次读数的平均值。硬度取两次读数的平均值。

#### 1.5 金相组织观察

用 Neophot 2 型显微镜, 采用普通明场和相衬法研究材料组织变化。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 电导率值和硬度值(见表 2)

表 2 电导率和硬度测试数据

淬火温度(℃)	电导率 $\sigma$ ( $m/\Omega \cdot mm^2$ )	硬度 HB
480	18.50	132
495	17.66	135.1
503	17.05	138.0
505	16.50	133.4
515	16.66	133.8
520	16.45	133.9

### 2.2 电导率和硬度变化曲线

由表 2 数据绘制出不同淬火温度下的电导率及硬度变化曲线见图 1、2。

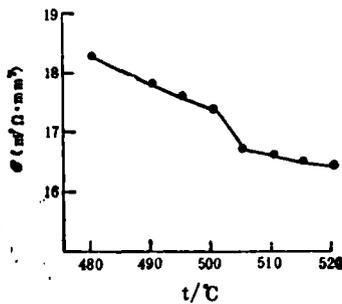


图 1  $t$ - $\sigma$  关系曲线

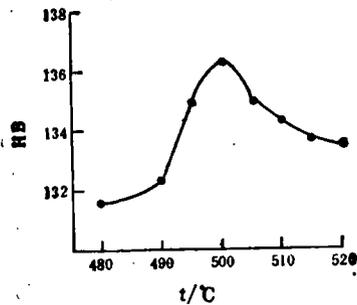


图 2  $t$ -HB 关系曲线

### 2.3 金相组织变化

在固溶温度为 495℃ 时, 光学金相组织的变化如图 3 所示。其它固溶温度下的照片不再列出。

### 2.4 结果与讨论

2.4.1 电导率变化: 随淬火温度上升, 电导率值逐渐下降。但从 505℃ 开始, 这种变化趋势减小, 并趋于稳定。

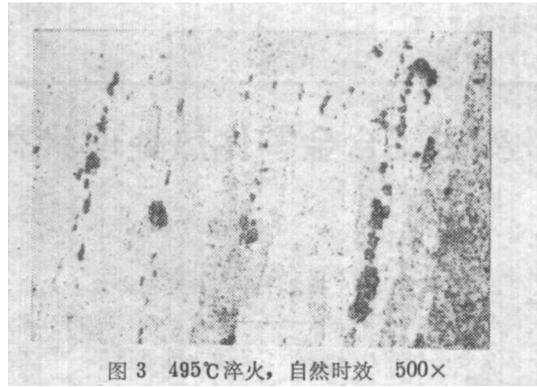


图 3 495℃ 淬火, 自然时效 500×

2.4.2 硬度变化: 在淬火温度为 480~500℃ 范围内, 随温度上升, 硬度值增大, 并在 500℃ 处达到峰值, 随后则逐渐下降。

2.4.3 组织变化: Ly12 合金正常组织为  $\alpha$  + 未溶 S、 $\theta$  相。495℃、500℃、503℃ 时均为这种正常组织。当温度达到 505℃ 时, 已看到有过烧现象。此时不仅晶界变粗, 而且已出现复熔共晶球(液相球)和三角晶界区。淬火温度超过低熔点共晶体的熔点时, 由于表面张力的作用, 使液相收缩成球状, 冷却下来就在组织中形成小圆球。在 510℃ 淬火的合金组织中, 过烧已较为严重, 不仅有液相球, 而且晶界与局部地区存在的低熔点共晶体熔化后, 侵蚀了固溶体。此外也可看到三角晶界区, 515℃ 淬火的组织过烧已很严重, 组织中出现粗大的三角晶界区。

从以上结果可知: 同样的硬度或电导率可以对应于材料的不同热处理阶段。这进一步证实了文献<sup>[1,2]</sup>中 M. ROSEN 和 M. NATAN 等人提出的观点, 即仅仅利用硬度或电导率来确定材料的组织状态是不可能的。但是把硬度和电导率结合起来, 则只对应于一种状态, 故变形铝合金的硬度-电导率法检验可作为估计显微组织的极好参考。作为一种分析方法, 它还有可能进一步揭示析出相与其它物理性能及机械性能之间的关系。

## 3 数理统计分析

由于变形铝合金涡流电导率及布氏硬度值作为随机变数受到许多相互独立的随机因素的影响, 而每个个别因素的影响都不起决定性作用, 且这些影响是可叠加的。因此, 由概率论的极限理论证明, 它们均可认为是服从以函数  $\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}$  ( $a$  和  $\sigma^2$  为大于零的常数) 为密度的连续分布, 即正态分布  $N(a, \sigma^2)$ 。

其次, 由数理统计知识中点估计和区间估计优劣评价的标准可知:

表3 正常淬火温度范围内的电导率和硬度值

试样号	04	07	10	12	14	23	25	28
$\sigma(m/\Omega \cdot mm^2)$	17.6	17.7	17.7	17.6	17.7	17.3	17.3	17.3
$(\sigma_i - \bar{\sigma})^2$	0.064	0.130	0.017	0.008	0.017	0.073	0.053	0.014
HB	133	131	135	135	135	135	137	134
$(HB_i - \overline{HB})^2$	4.121	16.241	0.001	0.001	0.001	0.001	3.881	1.061

表4 临界过烧温度点上的电导率和硬度上限值

试样号	35	36	37	38	28	40	15	16	17	18
$\sigma(m/\Omega \cdot mm^2)$	16.6	16.8	16.7	16.7	16.7	16.8	17.2	17.2	17.3	17.1
$(\sigma_i - \bar{\sigma})^2$	0.109	0.017	0.053	0.040	0.053	0.005	0.090	0.090	0.160	0.040
HB	—	134	135	135	135.5	130	133	134	130	129
$(HB_i - \overline{HB})^2$	—	1.361	4.708	4.708	7.129	8.009	0.029	1.561	8.009	14.669

3.1 根据矩阵法或最大似然法原理所得子样的  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$  及  $S = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$  均为总体期望及方差的无偏估计子。

3.2 在正常淬火温度范围内  $\sigma$ 、HB 区间值的确定实质上是对总体分布为  $N(a, \sigma^2)$ ，其中  $a, \sigma^2 (>0)$  均未知，找出  $a$  在置信水平为  $1-\alpha$  下的置信区间问题。

3.3 临界过烧温度点上  $\sigma$  和 HB 上限值的确定实质上是对总体分布为  $N(a, \sigma^2)$ ，其中  $a, \sigma^2 (>0)$  都未知，找出  $a$  的一个在置信水平  $1-\alpha$  下的置信上限问题。

3.4 在本实验范围内满足有关技术条件室温机械性能所对应的  $\sigma$  上限值及 HB 下限值的确定，实质上是对分布为  $N(a, \sigma^2)$  的总体，其中  $a, \sigma^2 (>0)$  都未知，找出  $a$  在置信水平  $1-\alpha$  下的置信上限及置信下限问题。

据此，有以下数理统计结果：

3.4.1 在正常淬火温度范围内 (490~500℃) 的电导率和硬度值见表 3 (表中数值按  $n=15$  计算)。

$\bar{\sigma} = 17.54, \overline{HB} = 135.03, S_{\bar{\sigma}} = 0.0596, S_{\overline{HB}} = 0.5422$ 。取显著性水平  $\alpha=5\%$ ，查表得  $t_{14,0.975} = 2.145$ ，于是总体平均值在置信水平  $1-\alpha=95\%$  下电导率  $\sigma$  的置信区间为  $\bar{\sigma} - t \cdot S_{\bar{\sigma}} = 17.42, \bar{\sigma} + t \cdot S_{\bar{\sigma}} = 17.67$ ，即 (17.4, 17.7)。硬度 HB 的置信区间为 (133.9, 136.2)。

3.4.2 临界过烧温度点上的电导率和硬度上限值见表 4 (表中数值按  $n=10$  计算)。

$\bar{\sigma} = 16.90, \overline{HB} = 132.83, S_{\bar{\sigma}} = 0.0854, S_{\overline{HB}} = 0.8332$ 。取  $\alpha=5\%$ ，则  $t_{9,0.975} = 2.262, t_{9,0.975} = 2.306$ 。于是有  $\bar{\sigma} + t \cdot S_{\bar{\sigma}} = 17.09, \overline{HB} + t \cdot S_{\overline{HB}} = 134.75$ ，即有 95% 的把握认为临界过烧温度点上的电导率上限值为  $17.1m/\Omega \cdot mm^2$ ，硬度上限值为 134.8。

3.4.3 满足有关技术条件室温机械性能所对应的电导率上限值和硬度下限值。根据实验结果，抗拉强度  $\sigma_b$ 、屈服强度  $\sigma_{0.2}$  和延伸率  $\delta_5\%$  等室温机械性能指标在 480~520℃ 淬火温度范围内均符合 GB 3191—82 所规定数值。据此求得淬火温度为 480℃ 时的电导率上

表5 480℃时的电导率上限值和硬度下限值

试样号	$\sigma(m/\Omega \cdot mm^2)$	$(\sigma_i - \bar{\sigma})^2$	HB	$(HB_i - \overline{HB})^2$
01	18.47	0.001	131	0.444
02	18.50	0	132	0.109
08	18.53	0.001	132	0.109

限值和硬度下限值，见表 5。

$\bar{\sigma} = 18.5, \overline{HB} = 131.7, S_{\bar{\sigma}} = 0.017, S_{\overline{HB}} = 0.3322$ 。取  $\alpha=5\%$ ，查表得  $t_{2,0.975} = 4.303$ ，于是有  $\bar{\sigma} + t \cdot S_{\bar{\sigma}} = 18.6, \overline{HB} - t \cdot S_{\overline{HB}} = 130.24$ ，即有 95% 的把握认为淬火温度为 480℃ 时的电导率上限值为  $18.6m/\Omega \cdot mm^2$ ，硬度下限值为 130.24。

将以上结果归纳如表 6。

表6 Ly12 合金验收值 ( $1-\alpha=95\%$ )

电导率与硬度	淬火温度 ℃		
	480	490~500	505
$\sigma(m/\Omega \cdot mm^2)$	18.6	(17.4, 17.7)	17.1
HB	138.2	(132.2, 137.5)	134.75

#### 4 结束语

根据航空零件检测要求，本文在确定临界过烧温 (下转第 171 页)

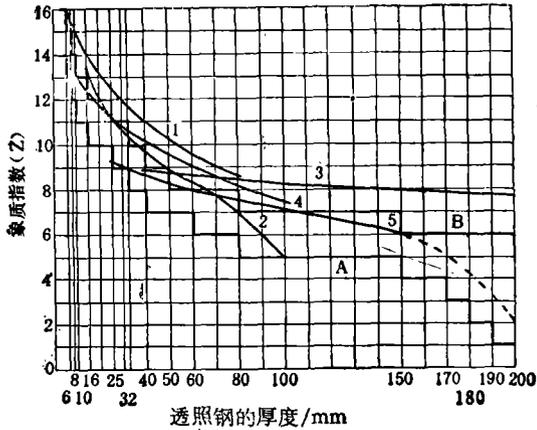


图 3

中象质指数与透照厚度的试验曲线(图 3)的结果。

如果只考虑用于常规 X 射线探伤的厚度范围,透照厚度取对数坐标,这样就可将图 3 曲线转绘成一定斜率的平行直线变化关系,如图 4 所示。

图 4 中直线 C 是使用  $\leq 300\text{kVX}$  射线,铅箔增感,微粒胶片的高等级象质要求,它的象质指数与透照厚度关系式为:

$$Z_c = 22 - 71\lg T \quad (3)$$

同理, B 级, AB 级, A 级的关系式为:

$$Z_B = 21 - 71\lg T \quad (4)$$

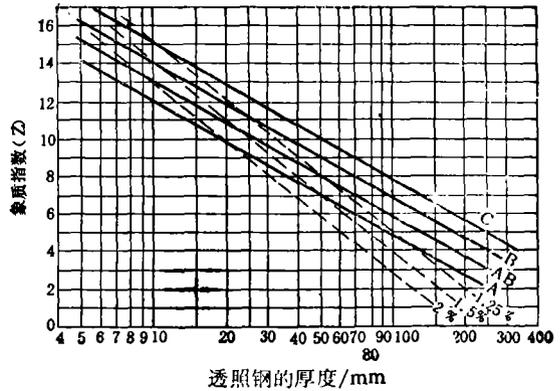


图 4

$$Z_{AB} = 20 - 71\lg T \quad (5)$$

$$Z_A = 19 - 71\lg T \quad (6)$$

式中  $T$  ——象质计灵敏度处的透照厚度(包括焊缝余高), mm

因为式(4)~(6)能够体现 GB3323—87 关系,那么用它来比较一下 GB3323—82。当透照厚度为 22~25mm 时两者的象质指数要求基本接近。当透照厚度小于 20mm 时,GB 3323—87 比 GB 3323—82 的象质指数要求减小,灵敏度要求下降,10mm 处下降一个象质指数。而在透照厚度大于 25mm 时象质指数要求提高了,50mm 处提高了一个象质指数。这说明 GB 3323—87 标准对较厚件透照要求比 GB 3323—82 的标准提高了。

(上接第 159 页)

度点上的电导率和硬度值时,采用了取置信区间下限值这种比较保守的做法。而在确定淬火温度为 480℃ 时的电导率和硬度值时,则各取其上限值或下限值,这是根据图 1、2 中曲线变化的不同特征决定的。同时,从所作实验数据分析、即使在低于 480℃ 固溶处理温度下,室温机械性能仍有可能满足 GB 3191—82 技术条件。但由于各种原因,进一步的试验工作尚未进行。

对各种国产铝合金材料,制定出不同规格、不同状态下的验收极限值,是许多单位生产实际中已迫切需要解决的课题。但从目前国内具体情况看,要形成一个公认的标准还有一定的距离。这需要铝合金生产厂和使用单位的共同努力,联合研究,才有实现的可能。

此外,电导仪及铝合金标块的标准化,是另一个迫切需要解决的问题。虽然国内方法标准对此作了规

定,但具体负责鉴定及传递的部门尚未落实,希望有关部门能引起重视。

本文实验工作得到本公司材料技术研究所詹孝慈等同志的支持与协作,在此表示诚挚的感谢!

## 5 参考文献

- 1 M. NATAN. Relationship between microstructure hardness and electrical conductivity of 2219 aluminum. Journal of Materials Science, 1983; 18(11): 3288
- 2 M. Rosen and E. Horouiple. The ageing process in aluminum alloy 2024 studied by means of eddy current. Materials Science and Engineering 1982; 53(2): 191
- 3 曾秋成编著. 技术数理统计方法. 安徽科学技术出版社, 1981: 62~73
- 4 《有色金属及其热处理》编写组. 有色金属及其热处理. 国防工业出版社, 1981: 45~132



邮局开始办理今年下半年度报刊收订,请新老读者尽快到就近邮局办理订阅手续。如错过邮局办理时间,可写信给上海市东长治路 999 号上海材料研究所发行组联系订阅(邮政编码 200082)。