

# LC9 超硬铝合金

王鸿渐 戴立金

## 一、前 言

LC9合金是冶金部东北轻合金加工厂和三机部六二一所研制成功的超硬铝合金<sup>[1-3]</sup>，相当于美国航空工业广泛应用的7075合金。

分析RF-101A及U-2美机残骸时发现，美国在两种飞机上从蒙皮、主梁到起落架主要受力构件，都用7075合金制造。而苏联认为：B95合金有应力腐蚀敏感、缺口敏感及静疲劳强度低等缺点，因而限制使用，至于起落架这样的部件，以前在苏联从未出现过铝合金的。

为吸取美机选材的经验，我们研制了LC9合金。

1965年在东北轻合金加工厂试生产了包铝板材，达到了预期的结果。其耐应力腐蚀性能、缺口敏感性能、周期强度均和7075合金包

铝板相当，优于B95合金板。

该材料已在飞机上用作平尾壁板，并在另一种飞机上用作前起落架，说明LC9合金可以用于飞机的各种主要受力构件。

三机部与冶金部于1978年2月14日到22日联合召开了LC9合金的鉴定会，对合金进行了鉴定。会议认为：LC9合金综合性能较好，技术文件基本齐全，并已成批生产，使用情况良好，应用日益广泛，可以逐步扩大使用，代替LC4合金。

## 二、合金成份

将历次美机残骸分析所得7075合金成份的分析结果作了统计，其Zn、Mg、Cu、Cr、Mn及Ti含量的机率曲线如图1、2。曲线表明：

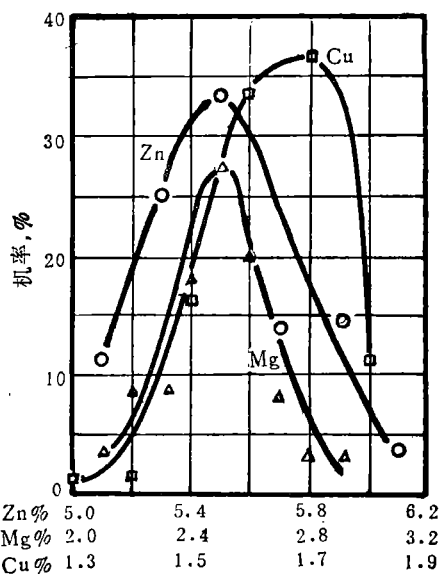


图1 美机残骸中7075合金零件 锌(82次)、镁(60次)、铜(61次)含量分析结果机率曲线

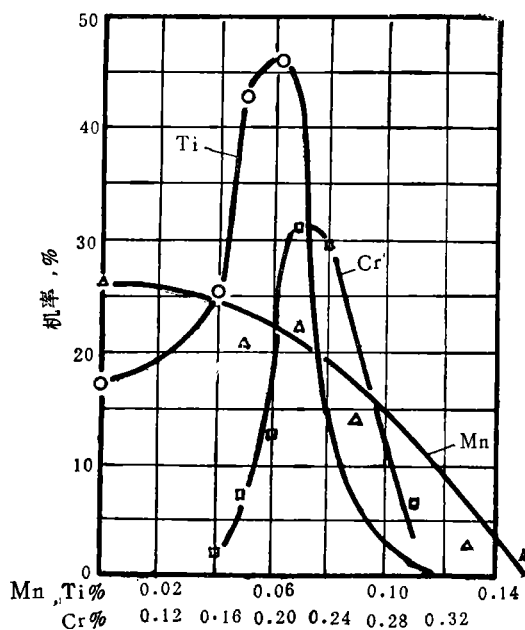


图2 美机残骸中7075合金零件 铬(52次)、钛(52次)、锰(58次)含量分析结果的机率曲线

美国生产的7075合金, Zn、Mg及Cu的含量都在标准规定范围内, 曲线的峰值都在平均成份处, 所以是按平均成份生产的; 从Mn及Ti的分布曲线可以清楚地看出, 这些元素不是加入的, 而是原料中带来的。为改进耐应力腐蚀性能, 7075合金以加入Cr为主, 合金中的Cr含量比标准规定低些, 标准规定Cr含量为0.18~0.40%, 而统计结果为0.16~0.30%, 曲线峰值约在0.22%处。

因此确定LC9合金的成份范围如表1所示

表1 有关合金的化学成份

| 合 金  | 化 学 成 份 , % |         |         |           |         |      |      |             | Al |
|------|-------------|---------|---------|-----------|---------|------|------|-------------|----|
|      | Zn          | Mg      | Cu      | Cr        | Mn      | Fe   | Si   | 其 他         |    |
| LC9  | 5.1~6.1     | 2.0~3.0 | 1.2~2.0 | 0.16~0.30 | ≤0.15   | ≤0.5 | ≤0.5 | ≤0.1        | 余量 |
| LC4  | 5.0~7.0     | 1.8~2.8 | 1.4~2.0 | 0.1~0.25  | 0.2~0.6 | ≤0.5 | ≤0.5 | ≤0.1        | 余量 |
| 7075 | 5.1~6.1     | 2.1~2.9 | 1.2~2.0 | 0.18~0.4  | ≤0.30   | ≤0.5 | ≤0.4 | Ti<br>≤0.20 | 余量 |
| 7178 | 6.3~7.3     | 2.4~3.1 | 1.6~2.4 | 0.18~0.4  | ≤0.30   | ≤0.5 | ≤0.4 | Ti<br>≤0.20 | 余量 |

### 三、热 处 理

淬火加热温度: 苏联资料规定 B95合金的淬火温度为 $470 \pm 5^\circ\text{C}$ ; 英国类似合金的淬火加热温度为 $460 \pm 10^\circ\text{C}$ ; 美国规定 7075 合金板材淬火加热温度为 $460 \sim 500^\circ\text{C}$ ; 锻件、挤压件为 $460 \sim 470^\circ\text{C}$ 。

图3为Al-Zn-Mg三元系铝角截面图<sup>[4]</sup>。从图中可以看出, LC9合金在 $460^\circ\text{C}$ 时落在单相区, 且距极限固溶度有相当的距离。所以, 较薄的产品的过烧温度可达 $532^\circ\text{C}$ 以上<sup>[11]</sup>, 而厚大产品由于成份不均匀则可能在 $480^\circ\text{C}$ 产生过烧。这是各国淬火加热温度不同的原因之一。

我们研究了淬火加热温度对LC9合金的机械性能和应力腐蚀性能的影响。在 $460 \sim 520^\circ\text{C}$ 范围内加热后淬火的LC9合金板的机械性能列

示。为便于比较, 表中同时给出了LC4、7075及7178合金的成份。

如表中数据所示: LC4合金的成份范围较宽, 这必将使LC4合金的性能波动较大。美国三十年前曾广泛使用过7178合金, 但近几年来, 由于其耐应力腐蚀性能和剥落腐蚀性能不理想, 使用范围越来越窄。从表中数据可以看出, LC4合金成份较低时, 相当于7075, 而成份较高时则相当于7178。因此, 可以看出LC9合金的成份比LC4的成份要合理。

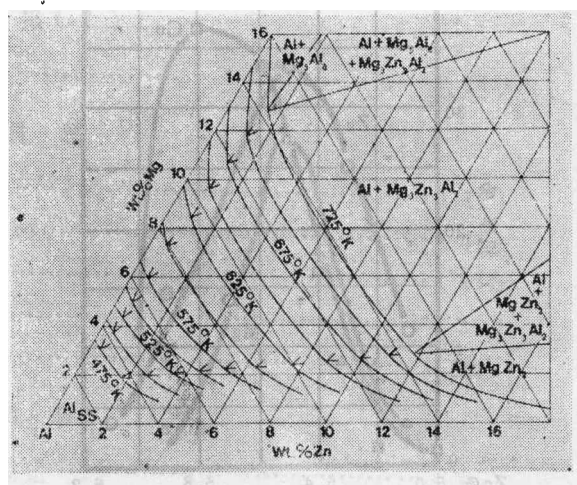


图3 Al-Zn-Mg系铝角的状态图

(不同温度的固溶度)

于表 2 中。从表中数据可看出：在此范围内淬火加热，材料的机械性能实际上没有变化。

表 2 淬火加热温度对 LC9 合金板材机械性能的影响

| 淬火加热温度<br>°C | $\sigma_b$         | $\sigma_{0.2}$ | $\delta$ |
|--------------|--------------------|----------------|----------|
|              | 公斤/毫米 <sup>2</sup> |                | %        |
| 460          | 53.5               | 45.5           | 18       |
| 470          | 54.0               | 46.0           | 18       |
| 500          | 54.0               | 46.5           | 18       |
| 520          | 54.0               | 46.5           | 18       |

G. Meikle<sup>[5]</sup> 发现淬火加热温度对 D. T. D. 683 合金的耐应力腐蚀性能有相当大的影响, 提高加热温度, 会降低应力腐蚀性能。  
我们的试验结果, 如图 4 所示。提高淬火加热温度, 耐应力腐蚀寿命有降低的趋势, 但其影响不如时效温度的影响激烈。

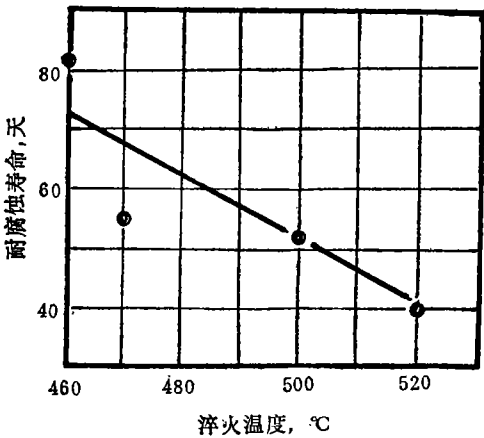


图 4 淬火温度对 7075 合金板材的耐应力腐蚀寿命的影响

既然在 460℃ 淬火, 材料的机械性能已达到最高水平, 而淬火温度较低时耐应力腐蚀性能也较好, 因此, LC9 合金的淬火温度定为 460~470℃ 比较合适。  
淬火加热保温时间, 与一般铝合金相同,

可按现行铝合金热处理说明书处理。  
时效制度: 美国 7075 合金是在 120℃ 保温 24 小时; 苏联 B95 合金板材规定为 120℃ 保温 24 小时, 锻件、挤压件为 140℃ 保温 16 小时; 而英国则规定在 135℃ 保温, 薄板不少于 8 小时, 厚板、锻件、挤压件不少于 12 小时。  
我们用 LC9 合金板材, 对比了这三种时效制度, 发现机械性能实际上没有变化, 如表 3 所示。耐应力腐蚀寿命则随着时效温度的提高而显著提高。135℃/8 小时时效后, 恒应力试样的耐蚀寿命已超过一个月。因此, 选择 135℃/8~16 小时为 LC9 合金板的时效制度。锻件、挤压件的高向耐应力腐蚀性要差些, 因此选择 140℃ 保温 16 小时为其人工时效制度。

表 3 LC9 合金板材经不同制度时效后的机械性能和耐蚀寿命

| 时效制度         | $\sigma_b$         | $\sigma_{0.2}$ | $\delta$ | 耐蚀寿命 |
|--------------|--------------------|----------------|----------|------|
|              | 公斤/毫米 <sup>2</sup> |                | %        | 小时   |
| 120°C, 24 小时 | 54.5               | 47.0           | 18       | 363  |
| 135°C, 8 小时  | 53.5               | 46.5           | 17       | >744 |
| 140°C, 16 小时 | 53.5               | 47.5           | 17       | >744 |

四、合金的机械性能

多年来用工厂批生产的 LC9 合金板、棒及锻件测试了合金的全面性能<sup>[6]</sup>, 并作了工业数据统计, 扼要介绍如下:  
用冶金厂生产的 LC9 和 LC4 合金板材及 U-2 蒙皮的 7075 合金板材测定的机械性能<sup>[7]</sup>, 列于表 4。表中数据表明, LC9 合金与 7075 合金包铝板材的机械性能实际上是相同的。  
从各航空厂统计了 0.5~2.5 毫米厚的板材机械性能数据 455 个, 结果如图 5 所示。图中数据表明工厂生产的 LC9 合金包铝板材的机械性能, 也完全符合 7075 合金包铝板材技术标准的规定<sup>[8]</sup>。

表4 LC9及其他几种合金板材  
室温拉伸性能及标准

| 合 金   | E                  | $\sigma_{0.2}$ | $\sigma_b$ | $\delta$ |
|-------|--------------------|----------------|------------|----------|
|       | 公斤/毫米 <sup>2</sup> |                |            | %        |
| LC9   | 6770               | 45.6           | 53.2       | 12.2     |
| 7075* |                    | 45.8~47.3      | 49.8~54.0  | 10~16.7  |
| LC4   |                    | 46.8           | 51.4       | 11.2     |

| 标 准 规 定 |             |                 |                    |                |          |
|---------|-------------|-----------------|--------------------|----------------|----------|
| 合 金     | 板材厚度<br>毫 米 | 包铝层<br>厚 度<br>% | $\sigma_b$         | $\sigma_{0.2}$ | $\delta$ |
|         |             |                 | 公斤/毫米 <sup>2</sup> |                | %        |
| LC9     | 0.5~2.5     | $\geq 4$        | 49                 | 42             | 7        |
|         | 2.6~10.0    | $\geq 2$        | 50                 | 43             | 7        |
| LC4     | 0.5~2.5     | $\geq 4$        | 49                 | 41             | 7        |
|         | 2.6~10.0    | $\geq 2$        | 50                 | 42             | 7        |
| 7075    | 0.3~1.0     | 4               | 49                 | 42.1           | 7        |
|         | 1.1~1.5     |                 | 50.4               | 43.6           | 8        |
|         | 1.6~4.7     | 2.5             | 51.3               | 44.3           | 8        |
|         | 4.8~6.4     | 1.5             | 52.7               | 45.0           | 8        |

\* 表中7075合金板材数据为美机U-2蒙皮测得。

表5 LC9等三种合金的侧缺口、  
周期强度及应力腐蚀性能\*

| 合 金                | LC9           | 7075        | LC4           |
|--------------------|---------------|-------------|---------------|
| 试验项目               |               |             |               |
| 侧缺口强度降低**<br>%     | 8.5~12        | 12          | 21~24         |
| 周期强度<br>(K=0.7) N次 | 3900~<br>6050 | 4100        | 2800~<br>3030 |
| 抗应力腐蚀寿命<br>小 时     | 288~<br>>720  | 305~<br>569 | 35~316        |

\* 均为几批试样的试验结果。

\*\* 侧缺口尖角半径R $\leq$ 0.02毫米。

从表5数据中可看出: LC9合金侧缺口强度降低8.5~12%, 7075合金降低12%, LC4合金降低21~24%, 这表明LC9合金的缺口敏感性能优于LC4合金, 和7075合金相同。周期

强度和抗应力腐蚀性能也与7075合金相当, 优于LC4合金。

棒材及锻件的室温性能列于表6中, 表中数据完全符合7075合金有关技术标准的要求。

对航空工厂多年入厂验收棒材及锻件的机械性能试验结果作了统计, 如图6~7。图中数据表明: 棒材、锻件都能满足7075合金有关技术标准的要求。断裂韧性数据载于表7中, 可见LC9合金的断裂韧性与7075合金<sup>[9]</sup>相比, 还是比较高的。

表6 棒材、锻件的室温机械性能

| 品 种 | 取样<br>方向 | $\sigma_{0.2}$<br>公斤/毫米 <sup>2</sup> | $\sigma_b$<br>公斤/毫米 <sup>2</sup> | $\delta_{10}$<br>% | HB<br>公斤/毫米 <sup>2</sup> | $a_k$<br>公斤·米/厘米 <sup>3/2</sup> |
|-----|----------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------------|
|     |          |                                      |                                  |                    |                          |                                 |
| 棒 材 | 纵向       | 61.4                                 | 66.0                             | 17.2               | 170                      | 1.53                            |
|     | 自由       |                                      |                                  |                    |                          |                                 |
| 自 由 | 纵        | 50.7                                 | 56.1                             | 11.5               | —                        | 1.68                            |
|     | 横        | 46.5                                 | 53.8                             | 6.0                | —                        | 0.38                            |
| 锻 件 | 高        | 48.4                                 | 53.3                             | 4.0                | —                        | 0.52                            |

注: 棒材是 $\phi 25$ 毫米的, 锻件是飞机前起落架下接头。

表7 LC9CS棒材( $\phi 80$ 毫米)及  
锻件的断裂韧性

| 棒 材  |                                  | 自 由 锻 件 |                                  |
|------|----------------------------------|---------|----------------------------------|
| 试样方向 | $K_{Ic}$<br>公斤/毫米 <sup>3/2</sup> | 试样方向    | $K_{Ic}$<br>公斤/毫米 <sup>3/2</sup> |
| L—C  | 130                              | L—T     | 100                              |

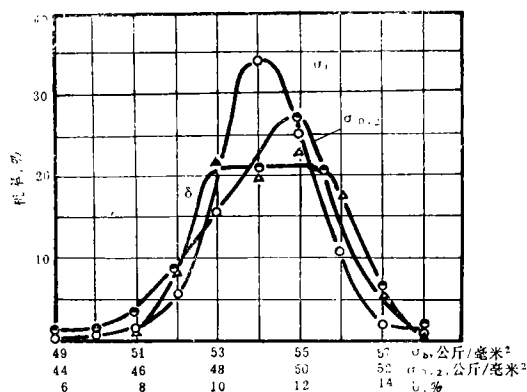


图5 板材(0.5~2.5毫米)机械性能工业统计曲线(共455个试样)

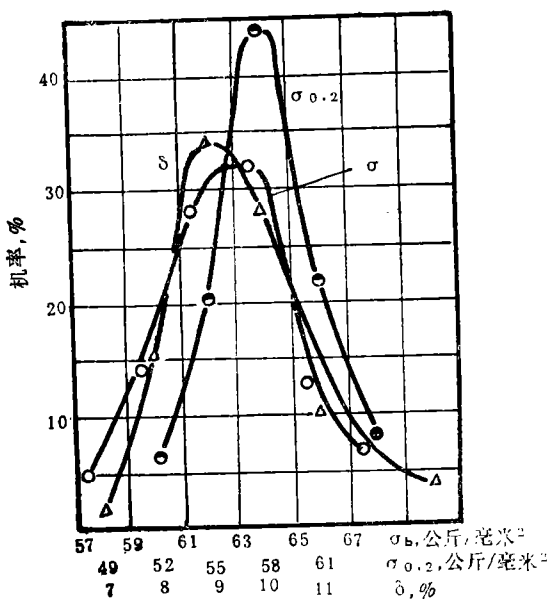


图 6 棒材 ( $\phi 15 \sim 180$  毫米) 机械性能工业统计曲线 (共 61 个试样)

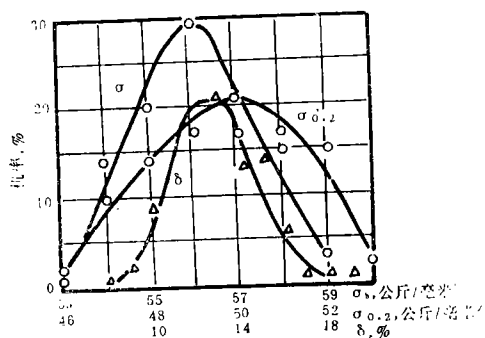


图 7 自由锻件的机械性能工业统计曲线 (共 86 件, 皆系锻件毛坯淬火所得)  
锻件毛坯尺寸:  $130 \times 180 \times 250$  毫米

LC9合金在一些飞机上得到了应用, 其使用范围正在日益扩大。如: 在一种飞机上用 LC9合金制作水平尾翼主要受力壁板, 提高了设计应力水平。在另一种飞机上用 LC9合金制做前起落架。该起落架使用情况良好, 并且经受过一次单独用它着陆的迫降, 事后检查零件完好。所以, 各方面的使用情况表明: LC9合金可以作飞机的各种受力构件。

## 参 考 文 献

- [1] B95型合金的研究, 第六研究所, 1965年5月。
- [2] LC9合金研制总结, 三机部六二一所、东北轻合金加工厂, 1977年8月。
- [3] LC9合金试制生产总结, 东北轻合金加工厂、三机部六二一所, 1977年11月。
- [4] L.F. Mondolfo, Aluminum Alloys: Structure and Properties, 1976.
- [5] Mr. G. Meitile, J. Inst Metals, 1956-1957. V. 85, p. 537.
- [6] LC9合金性能汇集, 三机部六二一所, 1977年8月。
- [7] U-2敌机残骸分析〈八〉, 第六研究院。
- [8] 美国波音飞机公司金属材料手册, 国外航空编辑部, 1977. 5.
- [9] Вязкость разрушения алюминиевых сплавов, 1976.

## 《十种铸造高温合金数据汇编》

### 即将出版

由朱高祖同志编写的《十种铸造高温合金数据汇编》收集了为航空燃气涡轮发动机涡轮叶片和导向叶片研制的铸造高温合金 K3、K5、K6、K14、K19、K19H、K20、K002 和定向凝固合金 DK3、DK5 的各种性能数据, 包括: 合金的化学成分; 瞬时拉伸、持久、蠕变、机械疲劳、冷热疲劳以及长期工作或时效后的机械性能; 抗氧化、抗腐蚀性能; 各种物理常数; 关于合金组织、工艺参数和合金用途的简述。有些合金还列出了模拟叶片工作状态的叶片振动疲劳性能、叶片热冲击性能以及反映合金壁厚效应的零件取样性能数据, 该汇编约 6 万字, 以表格和曲线为主, 附加简要说明。可供从事航空发动机和其它高温机械的科研、设计、生产、使用单位以及冶金工厂和高等院校的有关人员参考。如有需要者, 可向北京 81 号信箱 62 分箱发行组索取订单。