

# 固溶时效对 TC4ELI 钛合金组织和性能的影响

吕逸帆, 张 毅, 景宝全, 吕建军

(中国船舶重工集团公司, 洛阳 471039)

**摘 要:** 研究了固溶时效对 TC4ELI 钛合金室温拉伸性能、硬度、冲击韧性、断裂韧度及金相组织的影响。结果表明: 提高固溶温度、增大固溶冷却速率、降低时效温度可以提高 TC4ELI 合金的强度; 降低固溶温度、减小固溶冷却速率、降低时效温度可以提高 TC4ELI 合金的冲击韧性和断裂韧度; TC4ELI 合金金相组织中片状 $\alpha$ 相的形貌对合金的冲击韧性和断裂韧度起决定作用。

**关键词:** TC4ELI 钛合金; 固溶时效; 片状 $\alpha$ 相

中图分类号: TF 804.3

文献标志码: A

## Effects of solution treatment on microstructure and properties of TC4ELI titanium alloy

LÜ Yi-fan, ZHANG Yi, JING Bao-quan, LÜ Jian-jun

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471039, China)

**Abstract:** The effects of solution treatment on room temperature tensile properties, hardness, impact toughness, fracture toughness and metallurgical structure of TC4ELI titanium alloy were studied. The results show that the tensile strength of TC4ELI titanium alloy can be improved by enhancing solution temperature, cooling rate or by reducing aging temperature. The impact toughness and fracture toughness of TC4ELI titanium alloy can be improved by reducing solution temperature, cooling rate or aging temperature. The configuration of lamellar  $\alpha$  phase plays a determined effect on impact toughness and fracture toughness.

**Key words:** TC4ELI titanium alloy; solution treatment; lamellar  $\alpha$  phase

TC4ELI(Extra Low Interstitial)钛合金在 TC4 合金的基础上, 降低了间隙元素含量, 提高了合金的断裂韧度和降低了合金的裂纹扩展速率, 因此得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。本研究对 TC4ELI 钛合金进行固溶时效处理, 主要研究不同固溶时效热处理制度对 TC4ELI 钛合金室温拉伸性能、硬度、冲击韧性、断裂韧度及金相组织的影响。

分数)为: Al 6.15%, V 4.15%, Fe 0.045%, C<0.01%, N<0.005%, H 0.001 27%, O 0.123%, Ti 余量。将锻饼切割成小块, 分别在小块表面均匀涂覆防氧化涂料后整体进行相应热处理, 热处理后再切割、加工出标准试样进行试验。

### 1.2 试验方案

实验所采用的固溶时效热处理制度如表 1 所示。

## 1 实验

### 1.1 试样制备

实验所用材料为  $d$  450 mm $\times$ 200 mm 的 TC4ELI 合金锻饼, 合金相变点为(975 $\pm$ 5)  $^{\circ}$ C, 化学成分(质量

## 2 结果与分析

### 2.1 室温拉伸性能

表 1 TC4ELI 合金固溶时效制度

Table 1 Solution treatment of TC4ELI alloy

| Sample No. | Solution treatment regime           |
|------------|-------------------------------------|
| R1         | (960 °C, 1 h, WQ)+(760 °C, 2 h, AC) |
| R2         | (930 °C, 1 h, WQ)+(760 °C, 2 h, AC) |
| R3         | (930 °C, 1 h, AC)+(760 °C, 2 h, AC) |
| R4         | (930 °C, 1 h, AC)+(560 °C, 4 h, AC) |

4 组实验得到合金的室温强度如图 1 所示, 塑性如图 2 所示。

由图 1 和图 2 可知 4 种固溶时效制度下, TC4ELI 合金均获得较高的强度和塑性。

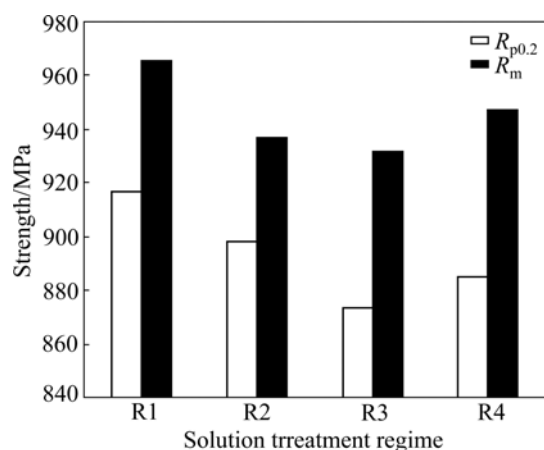


图 1 TC4ELI 合金的室温拉伸强度

Fig.1 Room-temperature tensile strength of TC4ELI titanium alloy

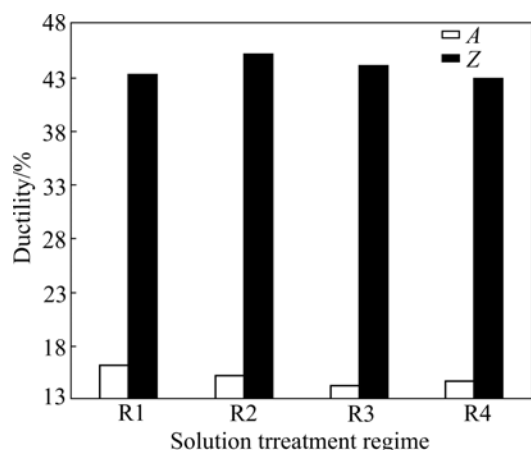


图 2 TC4ELI 合金的室温塑性

Fig.2 Room-temperature ductility of TC4ELI titanium alloy

由图 1 可知: 固溶时效 R2 和固溶时效 R1 相比, R2 固溶时效后合金强度较低, 说明合金强度随固溶温度的降低而降低, 即: 提高固溶温度可以提高合金强

度。固溶时效 R3 和固溶时效 R2 相比, R3 固溶时效后合金强度较低, 说明合金强度随固溶冷却速率的减小而降低, 即: 增大固溶冷却速率可以提高合金强度。固溶时效 R4 和固溶时效 R3 相比, R4 固溶时效后合金强度较高, 说明合金强度随时效温度的降低而提高。

由图 2 可知: 4 种固溶时效热处理制度下, 合金的塑性变化不大。A 值介于 14% 与 17% 之间, 变化趋势与强度的变化趋势相同; Z 值介于 42% 与 46% 之间, 变化趋势与强度的变化趋势基本相反。

## 2.2 硬度

4 组试验得到合金的硬度如图 3 所示。

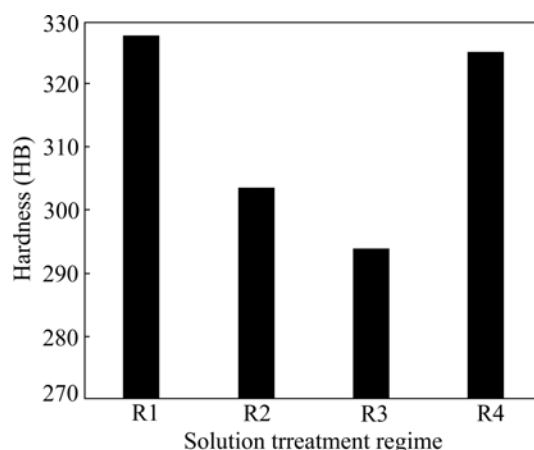


图 3 TC4ELI 合金硬度

Fig.3 Hardness of TC4ELI titanium alloy

对比图 3 和图 1 可见: 4 种固溶时效制度下, TC4ELI 合金的硬度与强度具有相同的变化趋势。

## 2.3 冲击韧性和断裂韧性

4 组试验得到合金的冲击韧性如图 4 所示, 断裂韧性如图 5 所示。

由图 4 和图 5 可知: 4 种固溶时效制度下, TC4ELI 合金的冲击韧性和断裂韧性具有相同的变化趋势。

固溶时效 R2 和固溶时效 R1 相比, R2 固溶时效后合金的冲击韧性和断裂韧性较高, 说明合金的冲击韧性和断裂韧性随固溶温度的降低而提高。固溶时效 R3 和固溶时效 R2 相比, R3 固溶时效后合金的冲击韧性和断裂韧性较高, 说明合金的冲击韧性和断裂韧性随固溶冷却速率的降低而提高。固溶时效 R4 和固溶时效 R3 相比, R4 固溶时效后合金的冲击韧性和断裂韧性较高, 说明合金的冲击韧性和断裂韧性随时效温度的降低而提高。

经过逐级提高, R4 固溶时效后的合金冲击韧性比

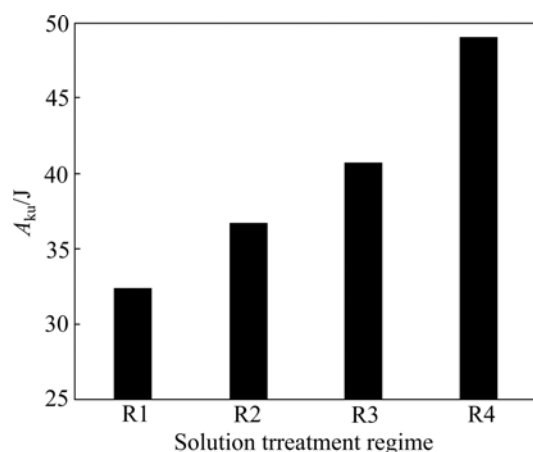


图 4 TC4ELI 合金的冲击韧性

Fig.4 Impact toughness of TC4ELI titanium alloy

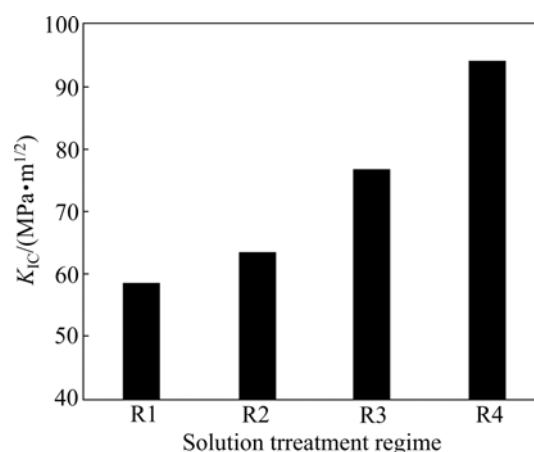


图 5 TC4ELI 合金的断裂韧性

Fig.5 Fracture toughness of TC4ELI titanium alloy

R1 固溶时效后的提高 51.56%, 断裂韧性提高 60.54%。

## 2.4 显微组织

4 种固溶时效制度下的 TC4ELI 合金的金相组织如图 6 所示。

由图 6 可见: R1 固溶时效后得到的合金金相组织为等轴初生  $\alpha$  相 + 时效  $\beta$  基体相, 时效  $\beta$  基体相包含马氏体分解  $\alpha$  相。同其它 3 组固溶时效后得到的合金

金相组织相比, 由于固溶温度较高, R1 固溶时效后合金组织中初生等轴  $\alpha$  相较少,  $\beta$  基体相较多, 这是导致 R1 固溶时效后合金强度较高的主要原因。R2 固溶时效后得到的合金金相组织为等轴初生  $\alpha$  相 + 时效  $\beta$  基体相, 时效  $\beta$  基体相包含粗大分散的片状马氏体分解  $\alpha$  相。R3 固溶时效后得到的合金金相组织为等轴初生  $\alpha$  相 +  $\beta$  转变组织,  $\beta$  转变组织由细小片状次生  $\alpha$  相集束和残余  $\beta$  相组成。相比 R2 固溶时效后得到的

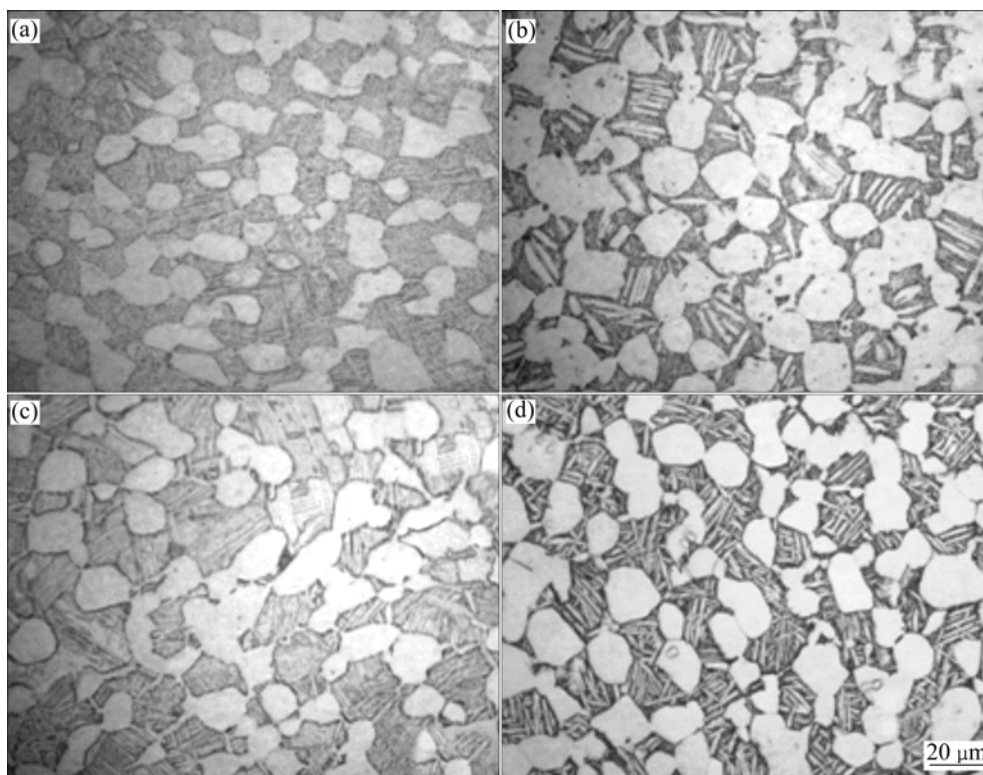


图 6 TC4ELI 合金的金相组织

Fig.6 Metallurgical structures of TC4ELI titanium alloy: (a) R1; (b) R2; (c) R3; (d) R4

粗大、分散的片状 $\alpha$ 相组织, 细小、片状 $\alpha$ 相集束组织更能提高合金的冲击韧性和断裂韧度。R4 固溶时效后得到的合金金相组织为等轴初生 $\alpha$ 相+ $\beta$ 转变组织,  $\beta$ 转变组织由交错分布的片状(网篮状)次生 $\alpha$ 相和残余 $\beta$ 相组成。相比 R3 固溶时效后得到的细小、片状 $\alpha$ 相集束组织, 交错分布的片状 $\alpha$ 相组织使合金的冲击韧性和断裂韧度得以进一步提高。

同一固溶温度下的 R2、R3、R4 热处理后合金金相组织的变化导致 TC4ELI 合金的冲击韧性和断裂韧度逐步提高, 说明合金组织中片状 $\alpha$ 相的形貌对合金的冲击韧性和断裂韧度起决定作用。细小、片状 $\alpha$ 相集束组织比粗大、分散的片状 $\alpha$ 相组织的冲击韧性和断裂韧度高, 交错分布的片状 $\alpha$ 相组织比细小、片状 $\alpha$ 相集束组织的冲击韧性和断裂韧度高。这 3 种组织的逐步变化使断裂裂纹扩展路径逐步增多, 造成裂纹扩展所需的能量逐级增加<sup>[4]</sup>, 最终表现为合金的冲击韧性和断裂韧度越来越好。

### 3 结论

1) 提高固溶温度、增大固溶冷却速率、降低时效温度可以提高 TC4ELI 合金的强度, 合金的硬度与强度具有相同的变化趋势。

2) 降低固溶温度、减小固溶冷却速率、降低时效

温度可以提高 TC4ELI 合金的冲击韧性和断裂韧度。

3) TC4ELI 合金组织中片状 $\alpha$ 相的形貌对合金的冲击韧性和断裂韧度起决定作用。

### REFERENCES

- [1] 王金友, 葛志明, 周彦邦. 航空用钛合金[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985: 208.  
WANG Jin-you, GE Zhi-ming, ZHOU Yan-bang. Aeronautical titanium alloys [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1985: 208.
- [2] 于兰兰, 毛小南, 李 辉, 冯宝香. TC4-DT 损伤容限钛合金强化机理[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(增 3): 630–632.  
YU Lan-lan, MAO Xiao-nan, LI Hui, FENG Bao-xiang. Study on strengthening mechanism of TC4-DT damage tolerance titanium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(S3): 630–632.
- [3] 曹春晓. 选材判据的变化与高损伤容限钛合金的发展[J]. 金属学报, 2002, 38(增 1): 4–11.  
CAO Chun-xiao. Change of material selection criterion and development of high damage-tolerant titanium alloy [J]. Acta Metallurgical Sinica, 2002, 38(S1): 4–11.
- [4] 有色金属及其热处理编写组. 有色金属及其热处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981: 240.  
Nonferrous Metal and Heat Treating Editorial Board. Nonferrous Metal and Heat Treating [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1981: 240.

(编辑 杨 兵)