

Ti80 合金时效过程中组织演变及其对力学性能的影响

郭爱红, 吴义舟, 陈庆磊, 宁二宾

(中国船舶重工集团公司 第七二五研究所, 洛阳 471039)

摘 要: 对热锻态 Ti80 合金进行 T_{β} (30~50 °C)淬火+(500~750 °C)、(4~8 h)时效处理, 测试了其拉伸和冲击性能, 采用 XRD、OM 和 TEM 分析时效后的相结构及显微组织特征。结果表明: 淬火态 Ti80 合金显微组织由棒状初生 α_p 相+亚稳 β_t 相+细小针状次生 α_s 相(宽度小于 0.1 μm)组成。经 500 °C 时效, 棒状初生 α_p 相球化, 亚稳 β_t 相转变为细小针状次生 α_s 相弥散析出, 使强度、塑性和冲击韧性均升高; 升高时效温度至 550 °C, 细小针状次生 α_s 相弥散析出相含量增加, 强度、塑性分别呈现小幅度升高和下降趋势, 冲击韧性急速下降; 继续升高时效温度, 初生 α_p 相与细小针状次生 α_s 相弥散析出相开始长大, 使强度、塑性大幅度下降, 冲击韧性显著升高。分析 Ti80 合金强度、塑性和冲击韧性-次生弥散 α_s 析出相特征-时效处理制度之间的系统关系, 指出次生 α_s 相弥散析出相含量及形貌特征变化是导致冲击韧性显著升高和下降的主要原因。

关键词: Ti80 合金; 时效; α_s 相; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG146.4

文献标志码: A

Microstructure evolution during ageing and its effect on mechanical properties of Ti80 alloy

GUO Ai-hong, WU Yi-zhou, CHEN Qing-lei, NING Er-bin

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

Abstract: The (500–750 °C), (4–8 h) aging treatments and then tensile and Charpy pendulum impact tests for quenched large Ti80 alloy were carried out. The microstructure was studied by XRD, OM and TEM. The results show that quenched metastable β phase transforms to fine acicular α phase and recovery happens in original α phase during aging. As a result, α grain is fine, the distribution of β phase between α grain becomes more uniformly, and the alloy obtains the higher match of strength-plasticity-toughness. However, when aging temperature increases and aging time is prolonged, α grain coarsens, which makes the toughness greatly increase, but the strength contrarily decreases. Finally, the relationship between microstructural evolution and the change of mechanical properties during aging is clarified.

Key words: Ti80 alloy; age; α_s precipitates; microstructure; mechanical properties

Ti80 合金是我国于 20 世纪 70 年代开发的一种近 α 型船用钛合金, K_{β} 为 0.19, 名义成分为 Ti-6Al-3Nb-2Zr-0.8Mo, 具有中等室温强度、高塑韧性、良好的焊接性能、优异的抗海洋环境腐蚀能力。可用于深潜器耐压壳体、高压容器、船舶焊接结构件等的建造^[1-8]。经过舰船钛合金应用研究单位 40 多年坚持不懈的研究开发与应用推广, Ti80 合金现已在船舶管路系统、紧固件、海洋救生浮标耐压壳体等船舶构件及水中兵器上获得了一定的应用。通常, Ti80 合金在退火状

态下使用, 屈服强度等级为 785 MPa, 难以满足在更高强度要求结构件上使用的需求。截至目前, 关于 Ti80 合金的研究主要集中在合金成分设计^[7]、合金元素对力学性能的影响^[9-11]、热处理温度对组织与力学性能影响^[12]、锻造工艺对显微组织与力学性能影响^[13]等方面。而关于 Ti80 合金固溶时效过程所发生的微观组织演变及力学性能变化规律的研究, 至今尚未见文献报道。

强度、塑性和冲击韧性是衡量金属结构材料的主

要性能指标,与合金相成分、结构、尺寸及含量等组织参量密切相关。但是,Ti80 合金时效过程中的物相转变和组织演变以及与性能之间的内在关系规律至今尚未见文献报道。为此,本文作者系统研究了 Ti80 合金时效处理制度-相变-性能(强度、塑性和冲击韧性)三者之间相互依存的关系规律,揭示了该规律存在的内在机理。

1 实验

1.1 实验材料

本研究所用试验材料为真空自耗电弧炉 2 次熔炼制备的铸锭,经 β 相区开坯,相变点以下 20~30 $^{\circ}\text{C}$ 多次锻造尺寸为 90 mm $\times$ 500 mm $\times$ 600 mm 热锻态 Ti80 锻件,其化学成分如表 1 所示。

表 1 Ti80 合金锻件化学成分

Table 1 Chemical composition of Ti80 forgings (mass fraction, %)

Al	Zr	Nb	Mo	Fe	Si	H	O	Ti
6.1	1.93	3.00	1.06	0.04	0.04	0.01	0.10	Bal.

1.2 实验仪器

本实验所用仪器主要有:厢式电阻加热炉;X 射线衍射仪 (ADVANCE D8);光学显微镜 OM (OLYMPUS GX71);透射电镜 TEM(Philips CM200);INSTRON 万能试验机;JB300B 冲击试验机。

1.3 实验方法

表 2 所示为 Ti80 合金固溶时效(STA)制度。从锻件上切取 66 mm $\times$ 60 mm $\times$ 90 mm 试块,按照表 2 所

表 2 Ti80 合金固溶时效(STA)制度

Table 2 STA procedure of Ti80 alloy

Sample No.	STA procedure
1	($\alpha+\beta$) phase region ST, WQ+(500 $^{\circ}\text{C}$, 4 h, AC)
2	($\alpha+\beta$) phase region ST, WQ+(500 $^{\circ}\text{C}$, 6 h, AC)
3	($\alpha+\beta$) phase region ST, WQ+(500 $^{\circ}\text{C}$, 8 h, AC)
4	($\alpha+\beta$) phase region ST, WQ+(550 $^{\circ}\text{C}$, 4 h, AC)
5	($\alpha+\beta$) phase region ST, WQ+(550 $^{\circ}\text{C}$, 6 h, AC)
6	($\alpha+\beta$) phase region ST, WQ+(550 $^{\circ}\text{C}$, 8 h, AC)
7	($\alpha+\beta$) phase region ST, WQ+(700 $^{\circ}\text{C}$, 6 h, AC)
8	($\alpha+\beta$) phase region ST, WQ+(750 $^{\circ}\text{C}$, 6 h, AC)

示的固溶时效制度进行处理。热处理后采用 X 射线衍射仪进行物相结构分析,采用金相显微镜(OM)和透射电镜(TEM)观察分析显微组织结构。在 INSTRON 万能试验机上测试室温拉伸性能,拉伸试样为标距段直径 5 mm、长 30 mm 的国标试样。室温冲击试样为高和宽 10 mm、长 55 mm 的 V 形缺口夏比冲击试样。

2 结果与讨论

2.1 时效温度和时间对相组成的影响

图 1 所示为 Ti80 合金不同温度 6 h 时效后 XRD 谱。由图 1 可以看出:($\alpha+\beta$)相区固溶淬火 Ti80 合金进行时效处理后, β 相含量减少;且随时效温度升高、时间延长, β 相减少量增加;当时效温度升高至 750 $^{\circ}\text{C}$ 、时效时间延长至 8 h 时, β 相含量非常少(小于 7%),XRD 谱已经探测不到 β 相。这是因为 Ti80 合金($\alpha+\beta$)相区固溶后低温淬火时, β 相中所含 β 稳定元素大于临界浓度,淬火后得过冷亚稳 β_t 相^[13-15];当较高温度(>550 $^{\circ}\text{C}$)时效时,过冷亚稳 β_t 相发生如下转变:亚稳 $\beta_t \rightarrow \alpha_s + \beta$,亚稳 β_t 相分解,析出 α_s 相。这可从透射电镜明场像形貌和电子衍射花样得到进一步证实。随时效温度升高和时效时间延长,亚稳 β_t 相向弥散 α_s 相转变分解更充分,使 β 相含量减少。当 750 $^{\circ}\text{C}$ 、6 h 时效后, β 相含量已减少至 7%以下。

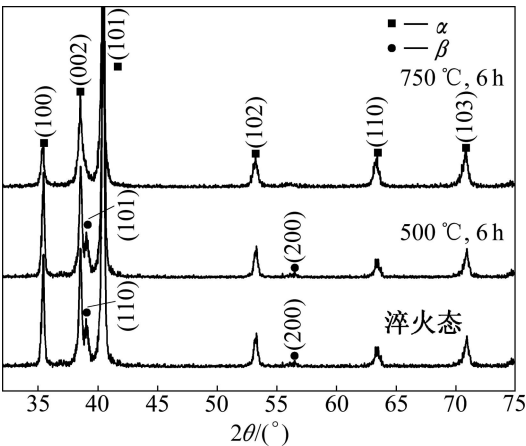


图 1 Ti80 合金不同温度 6 h 时效后 XRD 谱
Fig. 1 XRD patterns of Ti80 alloy aged at different temperatures for 6 h

2.2 时效处理对 Ti80 合金金相显微组织的影响

图 2 所示为 Ti80 合金淬火态和不同温度时效后的金相显微组织。由图 2(a)可以看出:Ti80 合金淬火态组织为长条状初生 α_p 相+ β 相转内次生 α 相,光学显

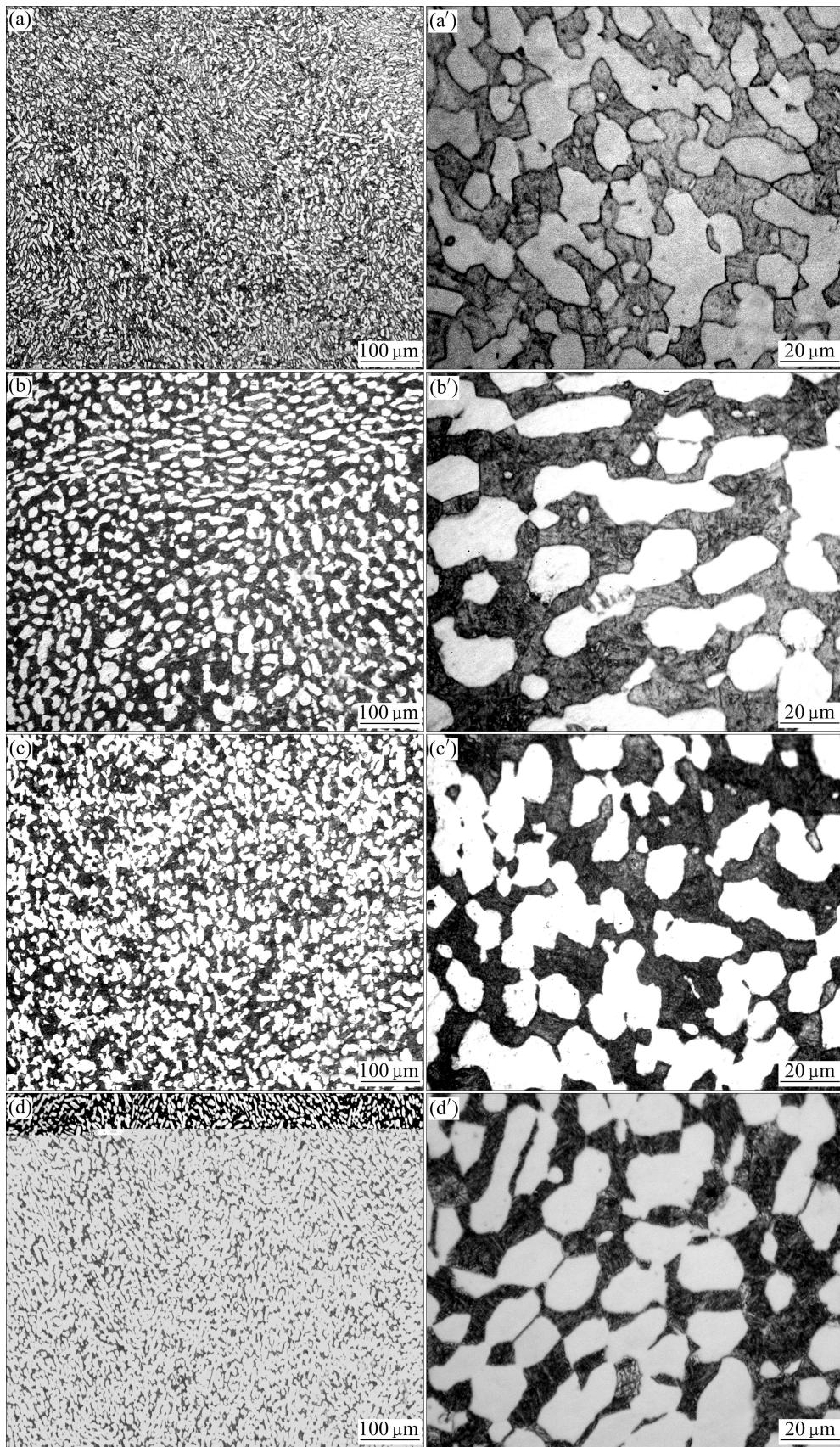


图 2 Ti80 合金不同温度时效不同时间后金相显微组织

Fig. 2 Optical microstructures of aged Ti80 alloy at different temperatures and time: (a) Quenched; (b) Aged at 500 °C for 6 h; (c) Aged at 550 °C for 6 h; (d) Aged at 750 °C for 8 h

显微镜下 β 转内次生 α 相模糊、不清晰, 且 α 相和 β 相衬度差异不明显, 黑白对比度小。500 °C, 6 h 时效处理后, 光学显微组织变清晰, α 相和 β 相衬度差异增大, 黑白对比强烈(图 2(b))。初生 α_p 相由长条状转变为球状, 亚稳 β_i 相在时效过程中发生分解, 生成尺寸极细小次生 α 相, 光学显微镜下已看不清其详细形貌特征。升高时效温度至 550 °C, 初生 α_p 相球化现象更明显, 且 α_p 相球尺寸变小, 次生 α 相尺寸细小, 光学显微镜下看不清其详细形貌特征。继续升高时效温度至 750 °C(图 2(c)), 延长时效时间至 8 h, 初生 α_p 相长大成棒状, 次生 α 相长大, 尺寸增加, 光学显微镜下隐约可见其细针状形貌。

2.3 时效处理对 Ti80 合金 TEM 组织的影响

图 3 所示为 Ti80 合金淬火态 TEM 组织形貌明场像及 α_p 相和 β_m 相选区电子衍射花样。图 3(a)表明: Ti80 合金淬火态组织为“长条状初生 α_p 相+ β_i 内细针状次生 α_s 相+ β_m 相”, 图 3(b)选区电子衍射花样证实了

β_m 相的存在。

图 4 所示为淬火 Ti80 合金 500 °C、6 h 时效后的 TEM 组织明场像。在相同较小倍数放大情况下, 500 °C、6 h 时效组织结构(图 4(a))与淬火态 Ti80 合金组织结构(图 3(a))相同, 为长条状初生 α_p 相+ β 转内细针状次生 α_s 相+ β_m 相。较高放大倍数下观察发现(图 4(b)): 时效态 Ti80 合金试样内, β_m 相含量减少, 细针状次生 α_s 相弥散分布, 前端为针尖状, 厚度尺寸约 50~80 nm, 淬火态试样内并未发现。说明这些纳米尺寸厚度的细针状次生 α_s 相是在低温(500 °C)时效过程中由过冷 β 亚稳相分解转变而来的, 这一结果与 X 射线衍射分析结果是一致的。

图 5 所示为 Ti80 合金 750 °C、8 h 时效后 TEM 组织。图 5 表明: 当时效温度和时间分别升高和延长至 750 °C、8 h 时, 次生 α_s 相转变成尺寸较大的细棒状(直径 100~200 nm), 前端针尖消失, 且棒状次生 α_s 相总量增加, 而过冷 β_m 相含量则大大减少。这说明: 此时过冷 β_m 相已得到充分分解。

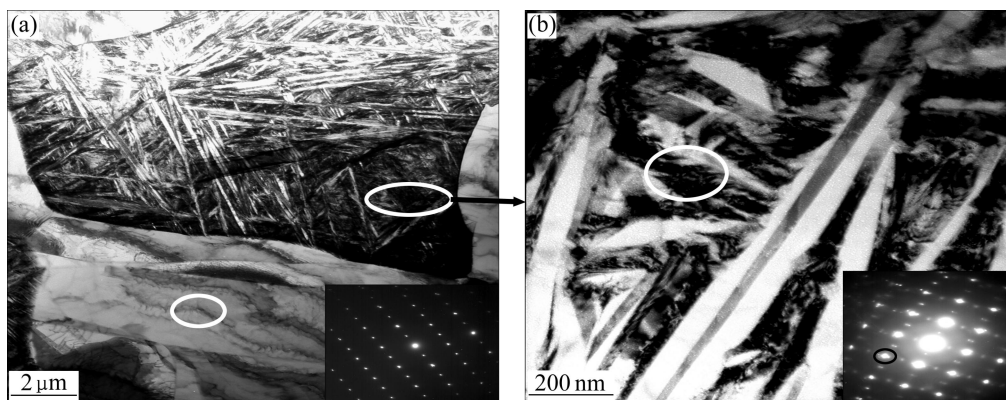


图 3 Ti80 合金淬火态 TEM 像

Fig. 3 TEM images of quenched Ti80 alloy: (a) Bright field image; (b) Metastable β phase and its electron diffraction

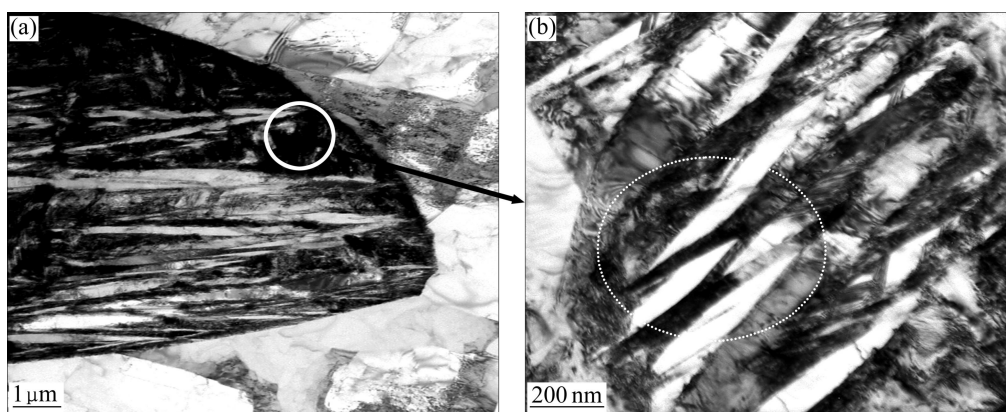


图 4 淬火态 Ti80 合金 500 °C、6 h 时效 TEM 像

Fig. 4 TEM images of Ti80 alloy quenched and aged at 500 °C for 6 h: (a) α_p phase+fine acicular α_s phase bright field image; (b) α_s bright field image

2.4 时效温度和时间对 Ti80 合金性能的影响

图 6 所示为 Ti80 合金拉伸性能和冲击韧性随时效温度变化曲线。图 6(a)表明: 500 °C 时效后, Ti80 合金强度和冲击韧性均大幅度上升; 升高时效温度至 550 °C, 强度、塑性和冲击韧性均下降; 继续升高时效温度至 750 °C, 冲击韧性大幅度上升, 强度和塑性显著下降。这是因为 500 °C 时效后, 过冷 β_m 相分解转变成细小弥散分布的针状次生 α_s 相, 使得位错不能够轻易绕过 α 相, 同时细小针状次生 α_s 相弥散分布使得两相界面增多, 造成第二相强化效应增强, 从而强度升高。此外, 淬火过程中产生的热应力释放, 以及无序 β_m 相向有序 α_s 相的转变, 使合金冲击韧性上升。升高时效温度至 550 °C, 次生针状 α_s 相长大, 合金强度、塑性和冲击韧性均下降。继续升高时效温度至 750

°C, 次生 α_s 相长大, 由细小针状长大到粗大棒状。由于弥散针状次生 α_s 相的减少, 合金中两相界面面积减少, 第二相强化效果减弱, 强度下降。同时, 在冲击断裂过程裂纹形成阶段充当裂纹形核中心、在裂纹扩展阶段充当裂纹扩展通道的细小针状次生 α_s 相长大到粗大棒状, 提高了合金抵抗裂纹形成和扩展的能力, 故冲击韧性显著提高。综合对比分析, 500 °C 时效后, Ti80 合金获得最佳“强度-塑性-冲击韧性”匹配。

图 7 所示为 500 °C 时效时时效时间对 Ti80 合金性能影响规律。图 7 表明: 随时效时间延长, 强度和塑性变化不大, 冲击韧性先升高, 6 h 后开始下降。这表明, 经 500 °C 时效 6 h 时, Ti80 合金淬火应力释放完毕, 随时效时间延长, 针状次生 α_s 相析出量增加, 冲击韧性开始下降。

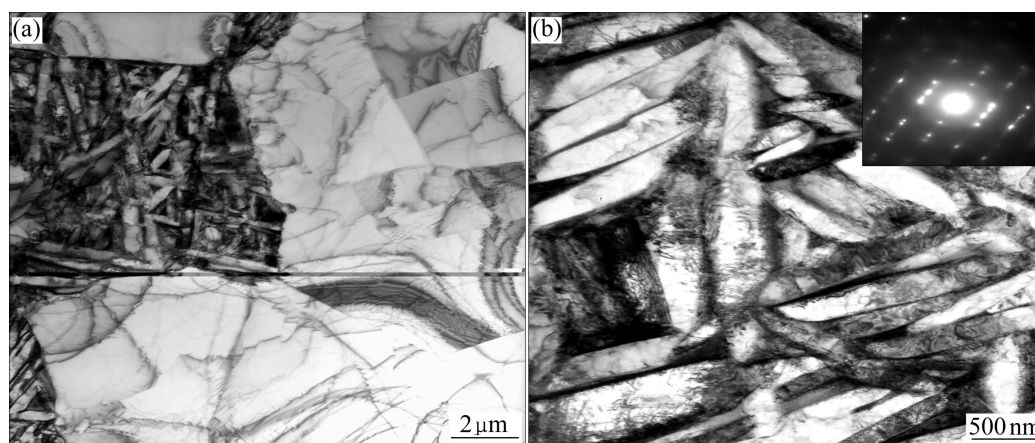


图 5 Ti80 合金 750 °C、8 h 时效后 TEM 像

Fig. 5 TEM images of Ti80 alloy quenched and aged at 750 °C for 8 h: (a) Bright field image; (b) α_s phase bright field image and electron diffraction patterns

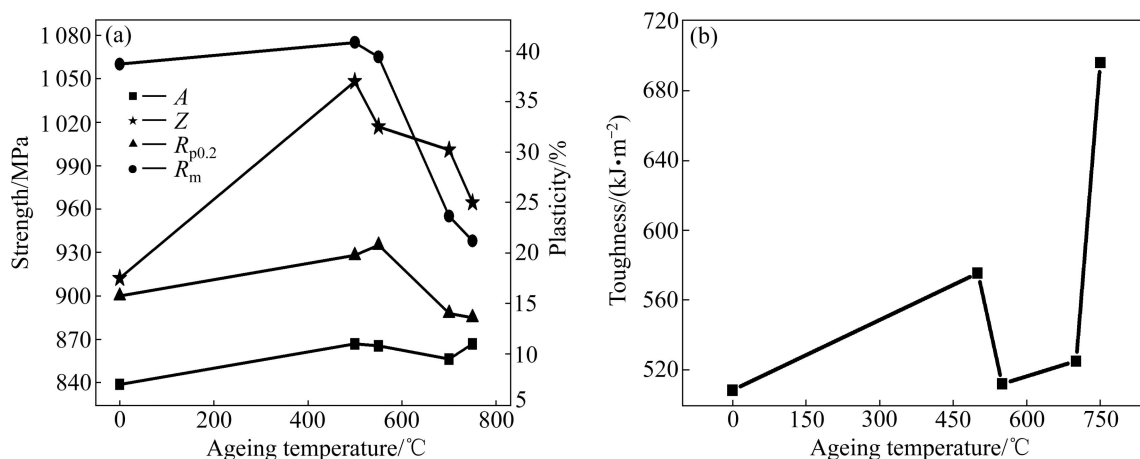


图 6 Ti80 合金性能随时效温度变化曲线

Fig. 6 Curves of properties vs aging temperature for Ti80 alloy: (a) Tension property—aging temperature; (b) Pendulum toughness—aging temperature

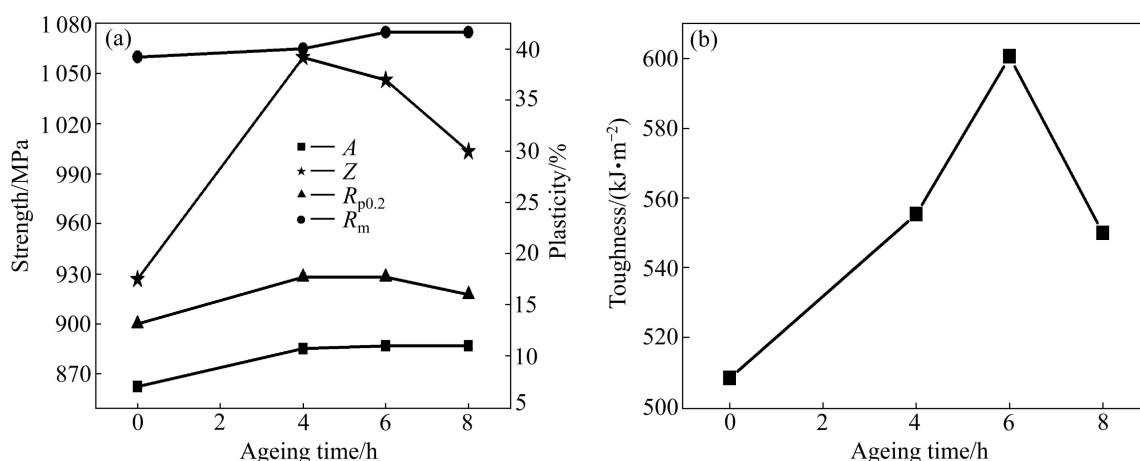


图 7 于 500 °C 时效 Ti80 合金性能时间变化曲线

Fig. 7 Curves of properties vs aging temperature for Ti80 alloy: (a) Tension property—aging time; (b) Pendulum toughness—aging time

3 结论

- 1) Ti80 合金低温时效过程中生成的细小针状次生 α_s 相对合金具有强强化作用,但也导致冲击韧性下降。
- 2) 随时效温度升高,针状次生 α_s 相长大至棒状,合金强化下降,冲击韧性上升。
- 3) 随时效时间延长,合金强度和塑性变化不大,冲击韧性先升高后降低。

REFERENCES

- [1] 邵世单. 船用 Ti6Al3Mo2Zr1Nb 钛合金的应用[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(增刊 3): 110–112.
SHAO Shi-dan. The application of Ti6Al3Mo2Zr1Nb titanium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(Suppl 3): 110–112.
- [2] 古一, 戚延龄, 夏长清, 李学雄, 王志辉. 热暴露对 TC11 钛合金组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 13(4): 997–1004.
GU Yi, QI Yan-ling, XIA Chang-qing, LI Xue-xiong, WANG Zhi-hui. Effects of thermal exposure on microstructure and mechanical properties of TC11 titanium alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 13(4): 997–1004.
- [3] ZHANG X D, WIEZOREK J M K, BAESTACK W A. Precipitation of ordered α_2 phase in Ti-62222 alloy [J]. Acta Mater, 1998, 46: 4485–4495.
- [4] ZENG L, BIELER T R. Effects of working heat treatment and aging on microstructural evolution and crystallographic texture of α , α' , α'' and β phase in Ti-6Al-4V wire [J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 392: 403–414.
- [5] LUTJERING G, WILLIAMS J C. Titanium [M]. Germany: Springer, 2003: 33–39.
- [6] LENYENS C, PETERS M. Titanium and titanium alloys [M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003: 33–39.
- [7] 曹振新, 张必强, 毛彭龄. Ti80 船用钛合金的研究[J]. 钛工业进展, 2005, 20(6): 22–25.
CAO Zhen-xin, ZHANG Bi-qiang, MAO Peng-ling. The research of Ti80 titanium alloy for ship building [J]. Titanium Industry Progress, 2005, 20(6): 22–25.
- [8] 蒋鹏, 孟宪亮, 刘茵琪. Ti80 合金锻造工艺对显微组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(增刊 3): 286–288.
JIANG Peng, MENG Xian-liang, LIU Yin-qi. The effects of forging process on microstructure and properties of Ti80 alloy [J]. Rare Metal Material and Engineering, 2005, 34(Suppl3): 286–288.
- [9] 毛彭龄, 曹振新. STi80 钛合金中合金元素对力学性能的影响[J]. 上海钢研, 2001, 4: 10–13.
MAO Peng-ling, CAO Zhen-xin. A study of effect of compositions on mechanical properties of titanium alloy STi80 [J]. Shanghai Steel Research, 2001, 4: 10–13.
- [10] 李赛毅, 文浩, 雷力明, 张慧儒. TC11 合金两相区退火对微观组织与微观结构的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(11): 3022–3028.
LI Sai-yi, WEN Hao, LEI Li-ming, ZHANG Hui-ru. Effect of annealing in two phase field on microstructure and microtexture of TC11 alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,

- 2012, 22(11): 3022–3028.
- [11] 李士凯, 惠松骁, 叶文君, 于 洋, 熊柏青. 微观组织对 TA15 ELI 钛合金损伤容限性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(7): 1119–1123.
- LI Shi-kai, HUI Song-xiao, YE Wen-jun, YU Yang, XIONG Bai-qing. Effects of microstructure on damage tolerance properties of TA15 ELI titanium alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(7): 1119–1123.
- [12] 文志刚, 王伟琪, 王小翔. 热处理温度对 Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo 合金板材显微组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(增刊 1): s647–s649.
- WEN Zhi-gang, WANG Wei-qi, WANG Xiao-xiang. Effects of heat treatment temperature on microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo alloy plate [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(Suppl 1): s647–s649.
- [13] 张 奕, 虞高峰, 雷锦文. 锻造工艺对 Ti6321 合金棒材显微组织与力学性能的影响[J]. 钛工业进展, 2010, 27(6): 34–35.
- ZHANG Yi, YU Gao-feng, LEI Jin-wen. The effects of forging process on microstructure and mechanical properties of Ti6321 stick [J]. Titanium Industry Progress, 2010, 27(6): 34–35.
- [14] 张喜燕, 赵永庆, 白晨光. 钛合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 98–99.
- ZHANG Xi-yan, ZHAO Yong-qing, BAI Chen-guang. Titanium alloy and application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 98–99.
- [15] 张尧武, 曾卫东, 史春玲, 康 超, 彭雯雯. 真空去应力退火对 TC18 钛合金残余应力及组织性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(11): 2780–2785.
- ZHANG Yao-wu, ZENG Wei-dong, SHI Chun-ling, KANG Chao, PENG Wen-wen. Influence of vacuum stress relieving annealing on residual stress and microstructure properties of TC18 titanium alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(11): 2780–2785.

(编辑 陈爱华)