

固溶处理对 Ti60 合金组织及拉伸性能的影响

罗文忠, 孙 峰, 赵小花, 张晓园, 雷锦文

(西部超导材料科技股份有限公司, 陕西 西安 710018)

摘 要: 通过对 600 °C 用 Ti60 高温钛合金在不同温度固溶热处理, 获得全 α' 和 $\alpha+\alpha'$ 2 种马氏体组织, 对比了 2 种组织特征及室温、300 和 600 °C 下的拉伸性能, 探讨了初生 α 相对力学性能的影响规律。结果表明淬火过程中 β 相全部转变为 α' 马氏体相, $\alpha+\alpha'$ 组织保留约 10% 初生 α 相, 初生 α 相的存在引起马氏体组织抗拉强度降低和塑性提升, 进而获得更加匹配的强度和塑性。其中 $\alpha+\alpha'$ 组织初生尺寸较大, 因为少量初生 α 相能够细化 β 晶粒尺寸, 通过增加晶界面积阻碍裂纹扩展, 进而提高塑性, 随着温度升高, 初生 α 相对合金塑性影响逐步减小。

关键词: 近 α 钛合金; 固溶处理; 马氏体; 初生 α 相; 拉伸性能

中图分类号: TG146.2+3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)12-3967-05

Ti60 钛合金是我国自主研发用于航空发动机压气机的近 α 型钛合金, 可以用于制造压气机叶片、轮盘、鼓桶以及整体叶盘等关键零部件, 能够在 600 °C 下长期稳定服役^[1-3]。为了提升 Ti60 钛合金高温蠕变、疲劳性能以及热稳定性, 往往采用一系列固溶时效热处理获得理想的组织和力学性能^[4-6]。钛合金通过固溶淬火难以实现强度提升, 往往需要进行低温时效, 在 β 基体中析出细小弥散的次生 α 相实现时效强化^[7-9]。这是因为钛合金组织中的亚稳 β 相在淬火过程中发生马氏体转变, 转变诱发的晶格畸变较小, 导致硬化作用不明显^[10,11]。另外, Ti60 等近 α 合金组织中也没有 ω 等硬脆相析出, 因此, 只能通过马氏体等温分解形成的细小密集的次生 α 相实现时效强化效果^[12]。

Lin 等人根据电子浓度理论分析发现钛合金中添加 Al、Sn、Fe 和 Cr 等元素利于形成六方结构的 α' 相, 而 Zr、Nb、W、Mo 和 V 等元素则利于形成 α'' 相, 因此 Ti60 合金从 β 转变温度以上冷却至室温过程中易形成 α' 相^[13,14]。钛合金中 $\beta \rightarrow \alpha'$ 转变符合 Burgers 关系: $(0001)\alpha' // (110)\beta$, $[11\bar{2}0]\alpha' // [111]\beta$, 且惯习面为 $\{334\}\beta$, 在 α' 马氏体内部也会出现层错、位错等缺陷^[15]。尽管 α' 马氏体没有直接产生强化作用, 但 Matsumoto 等人研究 Ti-V 以及 Ti-V-Sn 等合金系时发现, 较低 V 含量合金的淬火组织中存在大量的 α' 马氏体, 这种 α' 马氏体组织具有良好的冷轧变形能力, 经过冷轧后的 α' 马氏体被充分破碎, 形成约 60 nm 大小的亚结构^[16-18]。 α' 马氏体组织的形貌与结构直接决定了时效过程次生 α 相的

形核长大规律, 进而影响时效强化效果^[19,20]。因此, Matsumoto 等人进一步研究了 Ti6Al4V 合金的 α' 马氏体组织特征及力学性能, 发现合金组织中含有少量等轴 α 相时冷变形能力可达到 43.3%, 进而提升了 Ti6Al4V 合金冷加工性能^[18]。对于 Ti60 等近 α 合金, 铝当量较高, 难以将亚稳 β 相保留至时效温度, 因此合金不具备时效强化效果, 然而通过固溶热处理可以获得并调控马氏体显微组织结构, 一方面可以有效地提升合金室温塑性, 另一方面也能间接改善合金的时效强化效果, 最终实现合金加工及使用性能的提升。

本研究通过对 Ti60 钛合金分别进行 $T_{\beta}+10$ °C (1060 °C) 和 $T_{\beta}-10$ °C (1040 °C) 固溶淬火热处理, 最终获得全片层和双态 2 种马氏体组织, 随后在室温、300 °C 以及 600 °C 3 种条件下对 2 种组织进行拉伸性能测试。在分析马氏体组织特征与拉伸性能关系的基础上, 探讨了初生 α 相对马氏体组织塑性的影响规律, 为提升合金的时效强化能力提供帮助。

1 实 验

实验用 Ti60 钛合金的化学成分如表 1 所示。样品均取自西部超导材料科技股份有限公司生产的 $\Phi 300$ mm 规格棒材。

首先采用 3 次真空自耗电弧熔炼的铸锭进行开坯锻造, 随后在 $\alpha+\beta$ 相区改锻, 最终获得均匀模糊的锻态组织, 如图 1 所示, 该组织作为初始态组织。采用金相法测得 Ti60 钛合金的 β 转变温度为 1050 °C。

收稿日期: 2016-12-20

基金项目: 国家国际科技合作专项 (2013DFR50090)

作者简介: 罗文忠, 男, 1980 年生, 博士, 高级工程师, 西部超导材料科技股份有限公司, 陕西 西安 710018, 电话: 029-86538751, E-mail: dakr_sfg@126.com

表 1 实验用 Ti60 合金的名义化学成分

Table 1 Chemical composition of Ti60 alloy (wt%)

Ti	Al	Sn	Zr	Nb	Ta	Si	C
Balance	6	4	4	0.7	1.5	0.4	0.06

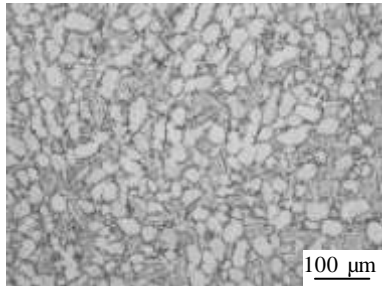


图 1 Ti60 合金 $\Phi 300$ mm 规格棒材锻态组织

Fig.1 Microstructure of the $\Phi 300$ mm forged bar of Ti60 alloy

采用电火花线切割在 $\Phi 300$ mm \times 20 mm 规格棒材的二分之一半径处截取 $\Phi 15$ mm \times 15 mm 圆柱型和 15 mm \times 15 mm \times 75 mm 方棒样品, 如图 2a 所示, 随后将 2 种样品按照图 2b 进行固溶淬火处理, 固溶温度分别为 1060 和 1040 $^{\circ}$ C, 样品保温 40 min 后水淬至室温。对圆柱型样品横截面进行精车、粗磨、细磨以及抛光, 最后用 Kroll 溶液(HF:HNO₃:H₂O=3:10:87)进行金相腐蚀, 并在 Olympus GX71 光学显微镜上观察显微组织。另外, 将方棒样品按照图 2 参考 GB/T 228-2002 加工成 $\Phi 6$ mm 试样, 标距为 30 mm, 拉伸速率为 1.2 mm/min。

2 结果与分析

2.1 显微组织分析

图 3a 和 3b 依次显示了经过 1060 和 1040 $^{\circ}$ C 固溶淬火处理得到样品的显微组织。与初始锻态组织对比, 1060 $^{\circ}$ C 固溶淬火组织全部由完全再结晶的大块多边形 β 晶粒组织构成, β 晶粒尺寸达到约 800 μ m, 近似

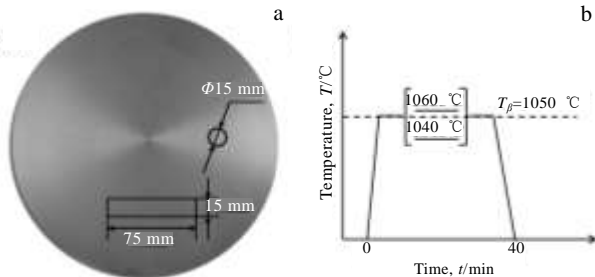


图 2 取样及固溶热淬火处理示意图

Fig.2 Schematics of sampling method (a) and solution treatments followed by quenching (b)

等轴的 α 相已经全部消失, 而且在晶界两侧也没有发现沿晶界析出或以片层形式向晶内生长的 α 相, β 晶粒内部则全部由针状片层组成, 相同晶粒内部片层存在一定交角, 片层较长且尺寸相近。根据钛合金相图可知, 在淬火条件下, Ti60 钛合金中过饱和的 β 相将保留至马氏体转变温度, 并以非扩散转变方式生成 α' 相, 马氏体相形核数量大且与基体保持近似 Burgers 关系, 因此易形成密集交错的网状结构^[21]。1040 $^{\circ}$ C 固溶淬火组织中保留了约 10% 的白色块状初生 α 相, 其余由 β 晶粒组织构成, 晶粒尺寸约为 400 μ m, 而保留的初生 α 相则在晶内和晶界同时存在。可以看出, 经过 40 min 保温, 初生 α 相已经发生球化, 并在组织中弥散分布。通常情况下, 锻态组织在固溶过程中发生静态再结晶, 未溶解的初生 α 相将充当第二相阻碍晶界迁移, 然而部分初生 α 相已经被包裹在 β 晶粒内部, 未能阻碍晶界迁移, 仅在晶界分布的初生 α 相阻碍了晶粒长大。初生 α 相对再结晶的影响主要取决于 α 相体积分数、尺寸以及与相邻 β 晶粒的位向关系^[22]。

2.2 拉伸性能对比

为了研究初生 α 相对 α' 马氏体组织在不同温度下力学性能的影响, 这里分别在室温、300 和 600 $^{\circ}$ C 下对全 α' 和 $\alpha+\alpha'$ 2 种固溶组织进行拉伸测试, 力学性能如表 2 所示。可以看出, 与 $\alpha+\alpha'$ 组织相比, 全 α' 马氏体组织在室温、300 和 600 $^{\circ}$ C 下抗拉强度和屈服强度较高, 而延伸率和断面收缩率略低, 屈强比则与 $\alpha+\alpha'$ 组织接近。

图 4 进一步通过柱状图对比了全 α' 和 $\alpha+\alpha'$ 组织在不同温度下的拉伸性能。可以看出, 合金的 2 种组织

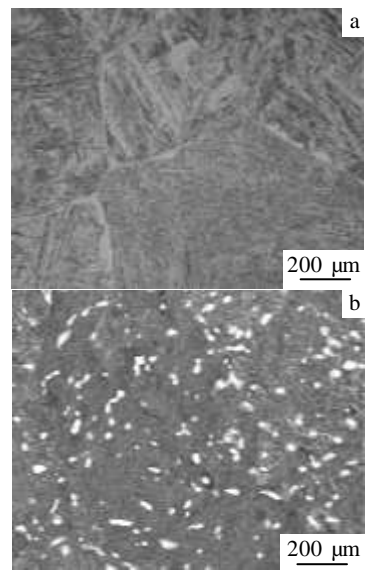


图 3 固溶淬火 Ti60 钛合金显微组织

Fig.3 Microstructures of the Ti60 alloy after solution treatment and quenching: (a) 1060 $^{\circ}$ C and (b) 1040 $^{\circ}$ C

表 2 固溶淬火组织 Ti60 钛合金力学性能

Table 2 Mechanical properties of Ti60 alloy with solution treated and quenched microstructures

Solution temperature/°C	Tensile temperature/°C	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	Ψ /%	$\sigma_b/\sigma_{0.2}$	
1060	Room temperature (RT)		1085	918	8.5	15	1.18
			1061	909	8	23	1.16
	300		835	645	11.5	35.5	1.29
			850	650	12	32	1.31
	600		740	525	16	54.5	1.41
			745	550	14	44	1.35
1040	RT		1034	872	14	34	1.19
			1037	884	11.5	32	1.17
	300		770	595	16.5	35	1.29
			770	595	14.5	41	1.29
	600		655	475	15.5	46.5	1.38
			685	480	17.5	45	1.43

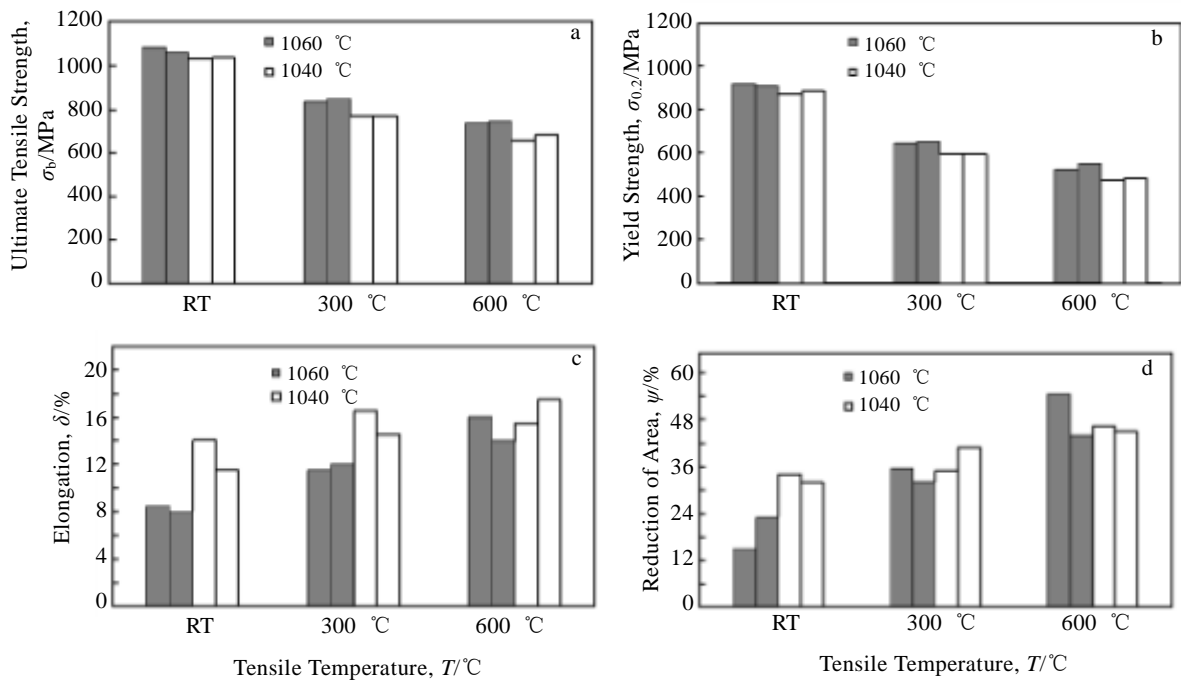


图 4 固溶组织 Ti60 钛合金力学性能

Fig.4 Mechanical properties of Ti60 alloy with solution treated microstructures: (a) tensile strength, (b) yield strength, (c) elongation, and (d) reduction of area

在 300 °C 时的抗拉强度比室温降低约 330 MPa，而 600 °C 时抗拉强度仅比 300 °C 时降低约 100 MPa，不同组织抗拉强度和屈服强度随温度变化规律较为一致。另外，对比图 4a 和 4c 可以发现， $\alpha+\alpha'$ 组织室温拉伸强度仅减少约 35 MPa，而延伸率提高约 5%，因此，少量等轴化的初生 α 相提升了 α' 马氏体组织的变形协调能力，进而使合金获得了更好的强塑性匹配。

图 5a 和 5b 对比了全 α' 和 $\alpha+\alpha'$ 2 种组织在不同温度下拉伸时的工程应力应变曲线，可以看出，随着拉伸温度升高，样品总应变增加，极限拉伸强度下降。在弹性阶段，2 种组织对应的应力应变变化规律接近，当拉伸强度达到极限后，尽管拉伸温度不同，但全 α' 组织的样品均发生明显的颈缩，随后断裂，而 $\alpha+\alpha'$ 组织缓慢达到拉伸极限后断开，没有发生明显的颈缩。

可见推测，含有少量的初生 α 相有利于避免颈缩现象，提升了样品在不同温度下的塑性变形能力。

2.3 断口形貌对比

为了进一步分析初生 α 相对 α' 马氏体组织塑性提升的机理，图 6 对 α' 和 $\alpha+\alpha'$ 2 种组织在不同温度下拉伸样品的断口形貌进行对比。图 6a 和 6b 分别显示了全 α' 和 $\alpha+\alpha'$ 组织在室温下的拉伸断口形貌，可以看出断口组织全部由细小的韧窝组成，具有典型的塑性断裂特征，其中 $\alpha+\alpha'$ 组织韧窝尺寸分布不均匀，且高低起伏更加明显。这是因为少量的初生 α 相在固溶过程阻碍 β 晶粒长大，进而增加了晶界面积，阻碍裂纹扩展，裂纹沿晶界扩展的同时形成几十微米大小的韧窝， β 晶粒内部的 α' 马氏体片层断开后形成几微米的小韧窝，而全 α' 组织晶粒尺寸较大，裂纹沿晶界扩展迅速，

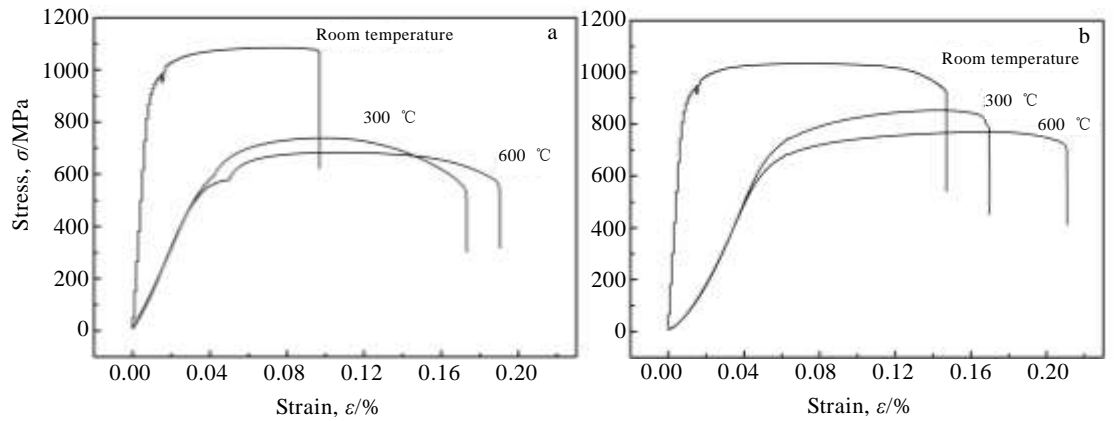


图 5 固溶组织 Ti60 钛合金工程应力应变曲线

Fig.5 Engineering stress and strain curves of Ti60 alloy with solution treated microstructures: (a) α' and (b) $\alpha+\alpha'$

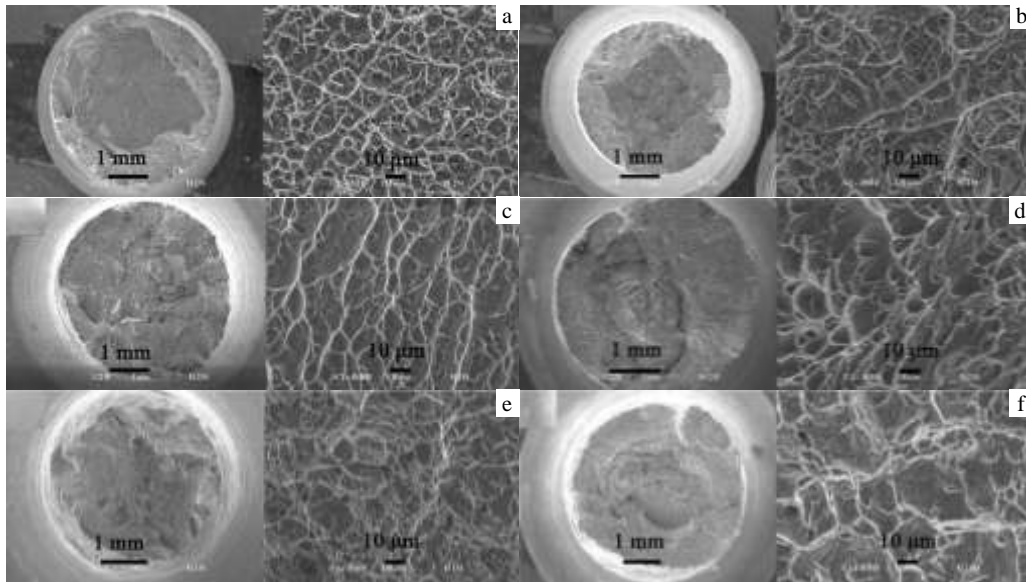


图 6 固溶组织 Ti60 钛合金在不同温度下拉伸断口形貌

Fig.6 Fracture morphologies of Ti60 alloy with solution treated microstructures at different temperatures: (a) α' at room temperature, (b) $\alpha+\alpha'$ at room temperature, (c) α' at 300 °C, (d) $\alpha+\alpha'$ at 300 °C, (e) α' at 600 °C, and (f) $\alpha+\alpha'$ at 600 °C

晶粒内部 α' 马氏体片层也随之快速断开，形成几微米的小韧窝，韧窝尺寸细小均匀。

当拉伸温度升高至 300 °C 时，图 6c 和 6d 韧窝尺寸增大，全 α' 马氏体组织的变化更加明显，这是因为在较高温度下，位错受热激活作用引起更多的滑移系开动， α' 马氏体相的变形能力增强，马氏体片层沿拉伸方向进一步伸长，小韧窝在塑性变形过程中合并形成较大尺寸的韧窝，与之相比， $\alpha+\alpha'$ 组织内部韧窝尺寸也更加均匀，尽管初生 α 相仍对 β 晶粒有细化作用，但对合金塑性的影响有所减弱。当温度进一步升高至 600 °C 时，韧窝尺寸进一步增加，初生 α 相的作用进一步减弱。

3 结 论

1) Ti60 钛合金在 1060 和 1040 °C 固溶淬火分别得到全 α' 和 $\alpha+\alpha'$ 马氏体组织，其中 $\alpha+\alpha'$ 组织保留约 10% 的等轴化初生 α 相，对应的抗拉强度较全 α' 组织降低约 35 MPa，而延伸率增加约 5%，具有较好的强度和塑性匹配关系。

2) 全 α' 和 $\alpha+\alpha'$ 2 种组织拉伸时均发生塑性断裂，其中全 α' 组织在室温拉伸时韧窝尺寸较小且均匀，而 $\alpha+\alpha'$ 组织韧窝尺寸大小差异较大，随着拉伸温度升高，2 种组织断口形貌逐步接近。

3) $\alpha+\alpha'$ 组织中少量的初生 α 相在固溶过程中阻碍

了 β 晶粒长大, 进而引起组织细化, 通过增加晶界面阻碍了裂纹扩展, 断口韧窝尺寸增加, 进而显著提升室温塑性。随着温度升高, α' 马氏体相变能力得到本质提升, 初生 α 相对合金塑性的影响减弱。

参考文献 References

- [1] Cai Jianming, Huang Xu, Cao Chunxiao *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2010, 39(11): 1893
- [2] Banerjee D, Williams J C. *Acta Mater*[J], 2013, 61(3): 844
- [3] Zhang Fang(张方), Chen Jing(陈静), Xue Lei(薛蕾) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2010, 39(3): 452
- [4] Lütjering G. *Mater Sci Eng A*[J], 1998, 243(1-2): 32
- [5] Wang Kaixuan, Zeng Weidong, Zhao Yongqing *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2010, 39(4): 565
- [6] Filip R, Kublak K, Ziaja W *et al.* *J Mater Proc Tech*[J], 2003, 133(1-2): 84
- [7] Ng H P, Douguet E, Bettles C J *et al.* *Mater Sci Eng A*[J], 2010, 527(26): 7017
- [8] Wain N, Hao X J, Ravi G A *et al.* *Mater Sci Eng A*[J], 2010, 527(29-30): 7673
- [9] Dehghan-Manshadi A, Dippenaar R J. *Mater Sci Eng A*[J], 2011, 528(3): 1833
- [10] Mantani Y, Kudou K. *J Alloy Compd*[J], 2013, 577(S1): 448
- [11] Neelakantan S, Galindo-Nava E I, San Martin D *et al.* *Mater Sci Eng A*[J], 2014, 590: 140
- [12] Jing R, Liang S X, Liu C Y *et al.* *Mater Sci Eng A*[J], 2013, 559: 474
- [13] Lin C, Yin G L, Zhao Y Q *et al.* *Mater Chem Phys*[J], 2011, 125(3): 411
- [14] Neelakantan S, Rivera-Diaz-del-Castillo P E J, van der Zwaag S. *Scripta Mater*[J], 2009, 60(8): 611
- [15] Banerjee D, Muraleedharan K, Strudel J L. *Philos Mag A*[J], 1998, 77(2): 299
- [16] Sato K, Matsumoto H, Kodaira K *et al.* *J Alloy Compd*[J], 2010, 506(2): 607
- [17] Matsumoto H, Yoneda H, Fabregue D *et al.* *J Alloy Compd*[J], 2011, 509(6): 2684
- [18] Matsumoto H, Yoneda H, Sato K *et al.* *Mater Sci Eng A*[J], 2011, 528(3): 1512
- [19] Sun F, Li J S, Kou H C *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2015, 44(4): 848
- [20] Ahmed T, Rack H J. *Mater Sci Eng A*[J], 1998, 243(1-2): 206
- [21] Stanford N, Bate P S. *Mater Sci Forum*[J], 2005, 495-497: 669
- [22] Vo P, Jahazi M, Yue S. *Metall Mater Trans A*[J], 2008, 39: 2965

Influence of Solution Treatment on the Microstructure and Mechanical Property of Ti60 Alloy

Luo Wenzhong, Sun Feng, Zhao Xiaohua, Zhang Xiaoyuan, Lei Jinwen
(Western Superconducting Technologies Co. Ltd, Xi'an 710018, China)

Abstract: Both of the α' and $\alpha+\alpha'$ martensite microstructures of Ti60 alloy as high temperature titanium alloy used up to 600 °C were obtained by solution treatments at different temperatures. The morphologies of the two microstructures were compared as well as the tensile properties at room temperature, 300 °C and 600 °C. The results indicate that all the β phase transforms to α' phase during quenching, and only about 10% primary α phase retains in the $\alpha+\alpha'$ microstructure. The little decrease of strength and great increase of ductility can be attributed to the partial solution of primary α phase. The size of dimple observed on the fracture of specimens with $\alpha+\alpha'$ microstructure at room temperature is larger than that with α' microstructure. Because the retained primary α phase dedicates to the refinement of β grains, leading to the disturbance of expansion of cracks by increasing the length of grain boundaries. The influence of the primary α phase on the tensile properties decreases with the increasing of the tensile temperature.

Key words: near α titanium alloy; solution treatment; martensite; primary α phase; tensile property

Corresponding author: Sun Feng, Ph. D., Western Superconducting Technologies Co. Ltd, Xi'an 710018, P. R. China, Tel: 0086-29-86538751, E-mail: dakr_sfg@126.com