

大规格 TC4 钛合金丝材直径对固溶时效 显微组织和力学性能的影响

张志强, 董利民, 关少轩, 刘羽寅, 杨 锐

(中国科学院 金属研究所, 沈阳 110016)

摘 要: 对 2 种直径的大规格 TC4 钛合金丝材进行相同制度的固溶时效热处理, 并对热处理后的试样进行显微组织和力学性能的对比研究。对显微组织变化细节进行观察分析, 并对提高大规格 TC4 钛合金丝材力学性能的工艺措施进行探讨。结果表明: 直径对大规格 TC4 钛合金丝材的显微组织有明显的影响, 进而对室温力学性能产生影响。

关键词: TC4 钛合金丝材; 固溶时效热处理; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG 146.2

文献标志码: A

Effects of diameter on microstructure and mechanical properties of large-size TC4 titanium alloy wires in solution treated and aged condition

ZHANG Zhi-qiang, DONG Li-min, GUAN Shao-xuan, LIU Yu-yin, YANG Rui

(Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: TC4 titanium alloy wires with two different diameters were solution and aging treated in the same time. Microstructures and mechanical properties of the heat treated samples were comparatively investigated. The details of microstructure difference were observed and methods for improving mechanical properties of large-size TC4 titanium alloy wires were discussed. The results show that wire diameter has a distinct influence on microstructures and mechanical properties for large-size TC4 titanium alloy wires.

Key words: TC4 titanium alloy wire; solution and aging treatment; microstructure; mechanical property

TC4 钛合金是一种中等强度的 $\alpha+\beta$ 型两相钛合金, 具有良好的综合性能, 被广泛用来制造各种航空航天用的棒材、丝材、锻件、厚板、薄板和型材等。由于该材料具有比强度高和与复合材料的电位特性相近的特点, 使该材料逐步替代钢材料和镍基合金材料在航空和航天紧固件领域获得了广泛应用^[1]。用 TC4 钛合金丝材加工紧固件需要采用固溶时效热处理工艺进行强化。由于 Ti 元素本身的导热系数小, 且 TC4 钛合金中 β 相稳定化元素含量较低, 致使其淬透性较差^[1]。可以推断, 随着紧固件直径的增加, 淬透性降低, 强度下降。为了提高大规格 TC4 钛合金紧固件的强度, 需要研究固溶时效热处理对不同直径丝材组织和性能

影响的规律, 在此基础上, 研究提高大规格 TC4 钛合金紧固件性能的工艺措施。在此, 本文作者对比研究 $d20\text{ mm}$ 和 $d10\text{ mm}$ 2 种不同直径 TC4 钛合金丝材固溶时效热处理后的显微组织和力学性能的差别, 并对提高大规格 TC4 钛合金丝材力学性能的工艺措施进行探讨。

1 实验

采用 3 次真空自耗熔炼制备 TC4 钛合金铸锭, 然后铸锭经开坯、锻造、轧制、退火等工艺, 制备出

$d20\text{ mm}$ 的丝材。为了排除成分和原始组织对力学性能的影响, 实验用的 $d10\text{ mm}$ 丝材是由同一铸锭和工艺制成的 $d20\text{ mm}$ 丝材经无心磨削而成的。对 2 种规格的试样一起进行固溶时效热处理, 热处理制度为: 于 950°C 保温 1.5 h , 水淬+ 540°C 保温 6 h , 空冷。物相分析采用 $\text{Cu K}\alpha$ 射线在 Rigaku D/max-2400PC XRD 衍射仪上进行。显微组织分析试样取自丝材心部, 采用 Shimadzu SSX-550 扫描电子显微镜和 Tecnai G² 20 透射电子显微镜进行分析。拉伸试验在 Shimadzu 拉伸试验机上进行, 采用 M10 标准拉伸试样, 屈服前拉伸速度为 1 mm/min , 屈服后拉伸速度为 5 mm/min 。

2 结果与讨论

2.1 直径对 TC4 钛合金相组成的影响

采用 X 线衍射仪分析不同直径 TC4 钛合金丝材固溶时效热处理后的相结构, 结果见图 1。

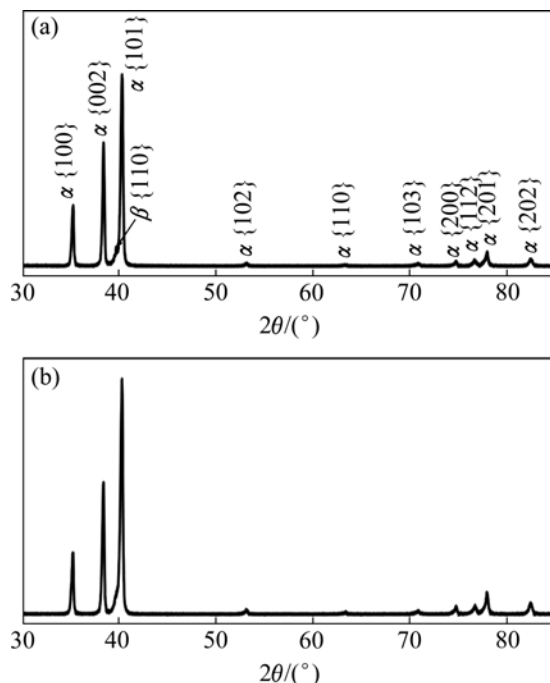


图 1 不同直径的 TC4 合金丝材固溶时效热处理后的 XRD 谱

Fig.1 XRD patterns of TC4 wires with different diameters after solution and aging treatment: (a) $d10\text{ mm}$; (b) $d20\text{ mm}$

从图 1 可以看出: 2 种直径试样经过相同固溶时效处理后, 相组成相同, 都由 α 相和 β 相组成。但是, 在直径为 20 mm 的试样的 XRD 结果中, β 相的衍射峰

值较高。通过计算不同直径试样 XRD 结果中 $I_{(110)\beta}/I_{(0002)\alpha}$ 来分析 β 相的体积分数变化(其中: $I_{(110)\beta}$ 为 β 相 (110) 晶面簇的衍射强度; $I_{(0002)\alpha}$ 为 α 相 (0002) 晶面簇的衍射强度, 得出直径为 10 mm 的试样该值为 0.143 , 而直径为 20 mm 的试样该值为 0.206 , 具体原因有待进一步研究。

2.2 直径对 TC4 钛合金显微组织的影响

图 2(a)和 2(b)所示分别直径为 10 mm 和 20 mm 的 TC4 钛合金试样经过固溶时效处理后的 SEM 像。

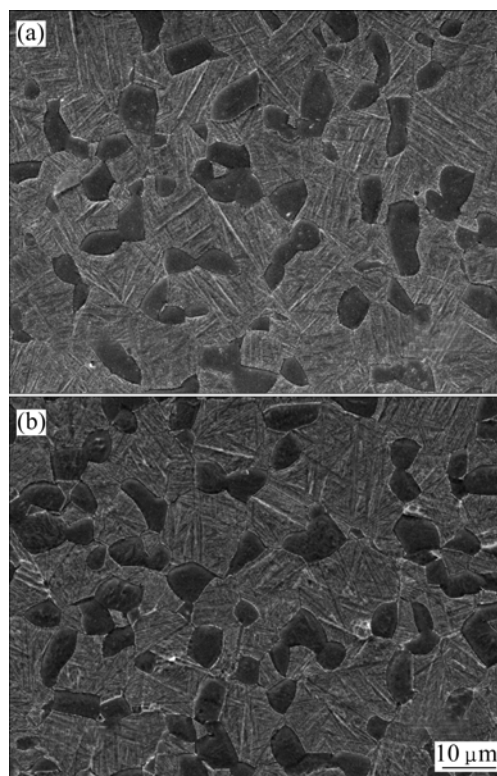


图 2 不同直径的 TC4 合金丝材固溶时效热处理后的 SEM 像

Fig.2 SEM images of TC4 wires with different diameters after solution and aging treatment: (a) $d10\text{ mm}$; (b) $d20\text{ mm}$

从图 2 可以看出: TC4 钛合金丝材经过固溶时效热处理后, 显微组织都由初生 α 相和 β 相转变组织组成, 黑色的等轴晶粒是初生 α 相, 灰色部分是 β 相转变组织。利用 Photoshop CS3 Extended 软件计算初生 α 相的体积分数。直径为 10 mm 和 20 mm 的试样的初生 α 相的体积分数分别为 0.289 和 0.327 , 可见: 随着试样直径的增加, 初生 α 相的体积分数增加。利用公式 $\varphi_{\alpha} = \varphi_{\alpha 0} (R/R_0)^3$ 可以计算初生 α 相尺寸的变化(其中: $\varphi_{\alpha 0}$ 和 φ_{α} 分别为初始的和长大后的初生 α 相的体积分数, 而

R_0 和 R 分别为初始的和长大后的初生 α 相尺寸^[2]。把直径为 10 mm 的试样的初生 α 相尺寸定为初始值 R_0 ，把直径为 20 mm 的试样的初生 α 相尺寸定为长大值 R ，计算所得 R/R_0 为 1.042。由于 TC4 钛合金本身导热系数小，试样直径增加会导致在固溶处理后进行淬火过程中，试样心部的冷却速率降低，维持温度较高，初生 α 相近似于等温长大，从而其尺寸有所增大，经过时效处理后，初生 α 相的尺寸也较大。

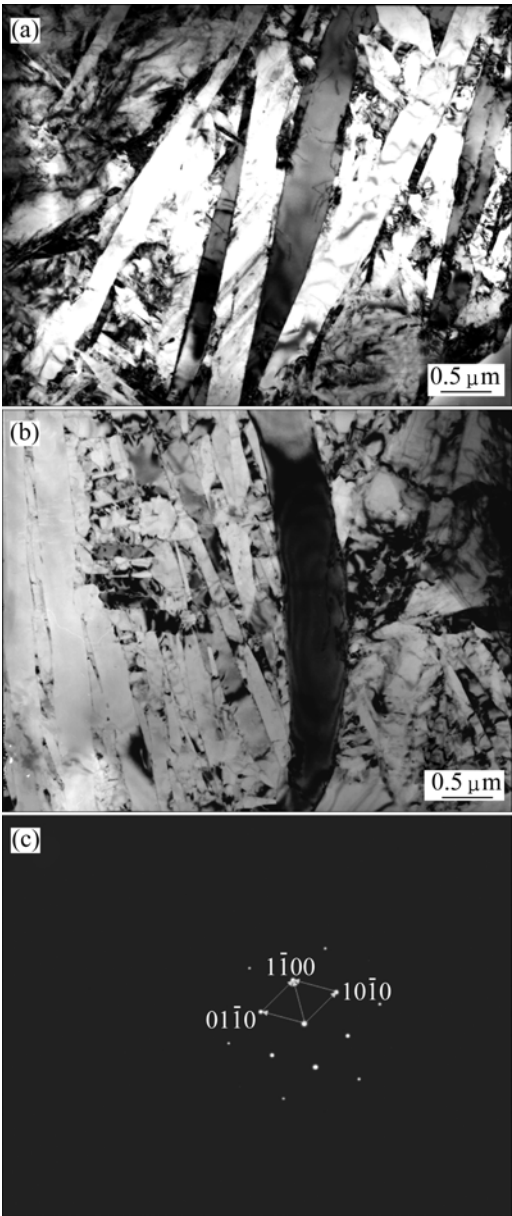


图 3 不同直径的 TC4 合金丝材固溶时效热处理后的 TEM 像和选区电子衍射照片

Fig.3 TEM images of TC4 wires with diameters of 10 mm(a) and 20 mm(b) after solution and aging treatment and selected area electron diffraction patterns(c)

图 3(a)和 3(b)所示分别是直径为 10 mm 和 20 mm 的 TC4 合金试样经过固溶时效处理之后的 β 相转变组织 TEM 像 ;图 3(c)所示为显微组织照片的选区电子衍射照片，晶带轴为 $[0002]_{\alpha}$ 。

TC4 钛合金试样经过 950 ℃ 保温 1.5 h，水淬后，形成了初生 α 相和 β 相转变组织，后者又可以分为六方马氏体 α' 相和保留下来的高温 β 相。固溶处理后的试样进行 540 ℃ 时效处理，主要的组织变化是过饱和的 α' 相通过 $\alpha' \rightarrow \alpha + \beta$ 方式转变为平衡组织^[3]。

从图 3(a)和 3(b)可以看出 2 种直径试样经过固溶时效处理后，次生 β 相在初生 α 相界、原先 α' 相板条边界和 α' 相板条内部缺陷处形核长大。选取 $[0002]_{\alpha}$ 晶带轴下的组织照片来观察次生 α 相板条最宽部位的宽度变化，直径为 10 mm 和 20 mm 的试样中次生 α 相板条宽度(最宽部位)分别为 0.484 μm 和 0.633 μm 。可见，丝材直径越大，次生 α 相板条越宽。

2.3 力学性能

表 1 所示是直径为 10 mm 和 20 mm 的 TC4 合金试样固溶时效处理后的室温拉伸性能。

表 1 不同直径的 TC4 合金丝材固溶时效热处理后的室温拉伸性能

Table 1 Mechanical properties of TC4 samples with diameters of 10 mm and 20 mm after solution and aging treatment

Diameter of TC4 samples/mm	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\delta_5/\%$	$\psi/\%$
10	1 200	1 130	12	47.5
20	1 120	1 030	15	51

注： σ_b 为抗拉强度； $\sigma_{0.2}$ 为屈服强度； δ_5 为伸长率； ψ 为断面收缩率。

从表 1 可以看出：直径为 10 mm 的 TC4 试样抗拉强度和屈服强度分别比直径为 20 mm 的试样的高 80 MPa 和 100 MPa，塑性略有降低。

2.4 讨论

直径分别为 10 mm 和 20 mm 的 TC4 试样经过同样的固溶时效处理后，相组成相同，但显微组织有差异。可以推断：随着直径的增加，显微组织出现细微差别，这是造成大直径丝材强度偏低的主要原因；随着直径的增加，固溶处理后初生 α 相体积分数增加， β

相转变组织体积分数的降低,从而导致时效后次生 α 相体积分数降低,随之试样强度降低;另外,在 β 相转变组织中,次生 α 相板条宽度增加,这将导致位错滑移距离的增加,同样将致使TC4丝材强度的降低^[4]。

由于Ti元素本身导热系数较低,添加的Al和V元素又较少,因此,TC4钛合金导热系数较低。当样品直径增大到某一临界尺寸时,对试样进行固溶处理,心部比边缘冷却速率降低很多,心部在高温区停留时间较长,初生 α 相长大, β 相转变组织体积分数降低,六方马氏体 α' 相体积分数降低,致使次生 α 相体积分数也降低;由于大尺寸试样心部冷却速率的较低,水淬时,六方马氏体 α' 相板条较粗,经过时效处理后,转变成的次生 α 相也较粗,导致位错滑移距离较大,强度降低。

从上述结果可以看出:直径对大规格TC4钛合金丝材性能有显著影响,这可用于解决生产大规格紧固件的丝材强度低的难题。针对大规格丝材,需要对成分进行微调,在保证塑性要求的前提下,依靠固溶强化效果来提高大规格丝材的强度。另外,还需要对淬火工艺进行控制。处于两相区的TC4钛合金在固溶处理淬火时,冷却分为3个阶段:蒸气膜阶段、沸腾阶段和对流阶段。前2个阶段对试件冷却速率影响较大。在蒸气膜阶段,试件进入淬火介质瞬间,淬火介质立即汽化,工件表面出现蒸气膜,由于膜的导热性能差,致使被它包围的工件冷却速率很低。在生产过程中,可以采用搅拌的手段,加快蒸气膜破裂,进入冷却的沸腾阶段。当蒸气膜破裂后,试样与介质直接接触,介质在工件表面激烈沸腾,不断溢出的气泡带走了大量热量,以致工件的冷却速度很大^[5]。选择淬火更剧烈的介质或剧烈搅拌可以提高淬火介质的冷却效果,增加工件的冷却速度,进而提高材料固溶时效后的强度。

3 结论

1) TC4钛合金丝材经过固溶时效处理后,直径为20 mm的试样与直径为10 mm的试样相比,初生 α 相体积分数增加, β 相转变组织体积分数降低,在 β 相转变组织中,次生 α 相板条宽度增加。这些变化导致滑移距离的增加,致使直径较大的试样强度降低。

2) 可以采用微调合金化元素含量和增加淬火冷却速度的工艺措施来提高大规格TC4紧固件丝材的强度。

REFERENCES

- [1] 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: 21-71.
ZHANG Xi-yan, ZHAO Yong-qing, BAI Chen-guang. Titanium alloy and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 21-71.
- [2] SEMIATIN S L, KNISLEY S L, FAGIN P N, ZHANG F, BARKER D R. Microstructure evolution during α - β heat treatment of Ti-6Al-4V[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2003, 34: 2377-2386.
- [3] DUPOUY J M, BEVER M B, AVERBACH B L. On the aging behavior of the alloy Ti-6Al-4V[J]. Transactions of the ASM, 1959, 52: 221-238.
- [4] LUETJERING G, WILLIAMS J C. Titanium[M]. Heidelberg: Springer, 2003: 192-212.
- [5] 李书常. 热处理使用淬火介质精选[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 1-2.
LI Shu-chang. Selected quench medium used in heat treatment[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 1-2.

(编辑 陈灿华)