

Ti-662 钛合金棒材的组织 and 性能

朱宝辉^{1,2}, 陈 林¹, 胡晓晨¹, 曾卫东², 刘彦昌^{1,2}, 范存莹¹

(1. 宁夏东方钽业股份有限公司 钛材分公司, 石嘴山 753000;

2. 西北工业大学 材料科学与工程学院, 西安 710072)

摘 要: 对 Ti-662 钛合金棒材进行锻造、固溶及时效处理, 利用光学显微镜、SEM 及力学性能试验对该合金 3 种状态下的显微组织和力学性能进行研究。结果表明: Ti-662 钛合金锻棒的组织为初生等轴 $\alpha+\beta$ 转变组织, 其强度较高, 伸长率较大, 抗拉强度达到 1 149 MPa, 伸长率为 16.5%; 合金经固溶热处理后初生 α 相明显增多, 主要组织为初生 α 相、马氏体转变的 α' 相和亚稳 β 相, 合金强度和伸长率有所降低, 但断面收缩率有所提高, 说明固溶处理有一定的软化作用; 经固溶处理后的棒材在时效处理过程中, 亚稳态组织析出细小弥散的次生 α 相, 使合金强度明显强化, 塑性略有降低, 且随着时效温度的升高, 强化效果下降, 塑性随之提高。

关键词: Ti-662 钛合金; 棒材; 显微组织; 性能

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

Microstructure and properties of Ti-662 alloy bars

ZHU Bao-hui^{1,2}, CHEN Lin¹, HU Xiao-chen¹, ZENG Wei-dong², LIU Yan-chang^{1,2}, FAN Cun-ying¹

(1. Titanium Product Plant, Ningxia Orient Tantalum Industry Co., Ltd., Shizuishan 753000, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The microstructure and properties of Ti-662 alloy under three conditions were investigated by using optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM) and measurements of mechanical properties for the bars processed by forging, solution and aging treatment. The results show that the as-forged microstructures of Ti-662 alloy bars are fine isothermal primary α and transition β phases, the strength and elongation are higher, the tensile strength and elongation of the alloy are 1 149 MPa and 16.5%, respectively. After solution heat treatment, the quantity of primary α phase of the alloy increases significantly, and the microstructures are mainly composed of isothermal primary α , martensite α' and metastable β phases. The strength and elongation decrease, but the reduction of area increases, which indicate that solution treatment has a softening effect. Fine dispersion secondary α phase precipitates from the metastable structures after solution and in aging process, and the alloy can be strengthened significantly with slightly reduced plasticity. With the increase of the aging temperature, the strengthening effect reduces, and the plasticity increases.

Key words: Ti-662 titanium alloy; bar; microstructure; properties

Ti-662 钛合金是一种富 β 稳定元素的两相钛合金, 名义成分为 Ti-6Al-6V-2Sn-0.5Fe-0.5Cu, 与 Ti-6Al-4V 合金相比, Ti-662 增加的 β 相稳定元素极大地改善了其热处理特性, 常温及高温性能均有明显的改进, 其退火态强度超过了 Ti-6Al-4V 退火态的强度, 同时也可进行固溶时效热处理, 达到更高的强度。由于其

优异的力学性能、耐热性能(可在 400 °C 以下长期使用)、较好的抗氧化和耐蚀性能, 优于其他合金的焊接性能等特点, 因此, Ti-662 钛合金被广泛应用于飞机机身、火箭发动机、核反应堆部件以及石油勘探设备等部件^[1-6]。国内相应的牌号是 TC10 合金, 应用比较少。近几年在迫击炮身管上曾有应用, 但仅限于军工

行业,在其他行业的应用较少,而且相关的研究也鲜见报道^[3-6]。

为此,本文作者主要研究不同状态的 Ti-662 合金棒材的组织及性能,以便为该合金的推广应用提供一定的参考。

1 实验

实验以一级海绵钛(粒度为 0.83~12.7 mm)、37% Al-80%Sn、Al-85%V、铜屑、铝豆和铁钉为原料,采用 3 t 真空自耗电弧炉经过 3 次熔炼制备铸锭,其化学成分(质量分数)为: 5.96%Al、5.93%V、2.17%Sn、0.78% Cu、0.82%Fe、0.106%O、0.032%C、0.007%N 和 0.0016%H,其余为 Ti。铸锭规格为 $d600$ mm 锭型,采用连续升温金相法测定其相变点为 (955 ± 5) °C。

铸锭在相变点以上 β 相区进行开坯锻造,经过反复锻拔,变形量达到 80%左右开始进行 $(\alpha+\beta)$ 两相区锻造。经过反复锻拔锻造至 $d110$ mm,然后经径向锻造至 $d90$ mm,对成品棒先进行固溶热处理(880 °C, 1 h, WC),然后分别选用 580、600 和 620 °C 进行时效热处理(保温 4 h, AC)^[4, 7-8]。锻造设备采用 16MN 快速液压锻造机和 SXP-13 径向锻造机。加热和固溶热处理设备为 3 级精度要求的箱式电阻炉,时效热处理设备为具有 2 级精度要求的箱式电阻炉。

对锻造态、固溶态和固溶时效态合金棒材分别进行取样。采用 Olympus GX51 金相显微镜观察显微组织,使用 INSTRON 4505 和 WDW-B100G 电子万能试验机分别测试合金的室温和高温拉伸性能,利用 JB-S300A 数显摆锤式冲击试验机测试合金的冲击韧性。棒材内部质量采用 CTS-2020 超声波探伤仪进行检测,并采用 JSM-6460 扫描电镜和能谱仪对时效态的合金断口、显微形貌及微区化学成分进行观察和分析。

2 结果与讨论

2.1 锻造态合金的组织及性能

图 1 所示为 Ti-662 合金锻造棒材的显微组织。可见锻造态 Ti-662 合金为典型的 $\alpha+\beta$ 两相组织,在 β 转变基体上分布着细小等轴初生 α 相(晶粒尺寸接近 10 μm),组织较为均匀,等轴初生 α 相含量约为 50%(质量分数),还有条状的次生 α 相。该显微组织粗略来说是等轴 $\alpha+\beta$ 转变组织,细分应是由初生等轴 α 相、条

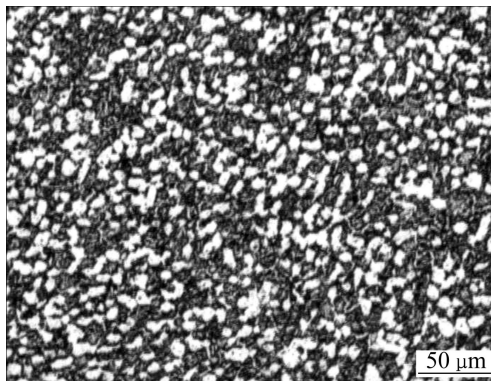


图 1 锻造态 Ti-662 合金棒材的显微组织

Fig. 1 Microstructure of as-forged Ti-662 alloy bars

状次生 α 相和 β 相残余组织组成,但仍为等轴组织。

表 1 所列锻造态合金棒材的拉伸性能。从表 1 中可以看出,该合金锻造态的强度都比较高,而且两项塑性指标也非常好,强度和塑性均比较好。虽然纵向拉伸性能略优于横向性能,但纵、横向性能差异较小,整体性能比较均匀,说明合金棒材锻造态的组织及性能均较好。

2.2 固溶态合金的组织及性能

图 2 所示为 Ti-662 合金棒材经过 880 °C 固溶热处理后的显微组织。与锻造态比较,经固溶处理后初生

表 1 Ti-662 合金棒材锻造态的拉伸性能

Table 1 Tensile properties of Ti-662 alloy for forged bars

Sample No.	Sample direction	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A_5 /%	Z /%
1	T	1 121	1 086	15.2	44.6
2	L	1 049	1 102	16.5	48.5

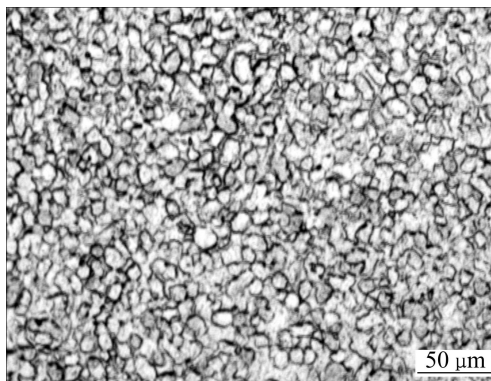


图 2 固溶态 Ti-662 合金棒材的显微组织

Fig. 2 Microstructure of solution-treated Ti-662 alloys bars

α 相明显增多, 由于 Ti-662 富含 β 相稳定元素, 水淬后的主要组织是初生 α 相、马氏体转变的 α' 相以及亚稳态 β 相^[1]。由淬火所得到的马氏体硬度降低而塑性增高, 而且存在非平衡相, 因而需要进行进一步的时效处理。表 2 所列为固溶处理后合金棒材的拉伸性能。经比较发现, 经固溶处理后的强度和伸长率比锻造态的均有所下降, 但断面收缩率明显提高, 说明合金棒材经过固溶水淬处理后不仅可以起到固溶的作用, 为时效做准备, 同时由淬火所得到的马氏体确实有一定的软化作用。

2.3 固溶时效态合金的组织及性能

对固溶态棒材分别在 580、600 和 620 °C 进行时效

表 2 固溶态 Ti-662 合金棒材的拉伸性能
Table 2 Tensile properties of solution-treated Ti-662 alloy bars

Sample No.	Sample direction	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A_5 /%	Z /%
1	T	1 077	1 054	14.0	54.7
2	L	1 079	1 149	14.4	50.7

效热处理, 不同时效温度处理后的固溶时效态棒材显微组织如图 3(a)~(d)所示。由图 3(a)~(d)可见, 随着时效温度的增加, 强化次生 α 相的数目增多并粗化, 弥散度变小。时效时产生的强化是由于淬火时形成的亚稳态 β 相分解时其强化效果最大, 时效时在 β 相内析出许多弥散 α 相, 并随着

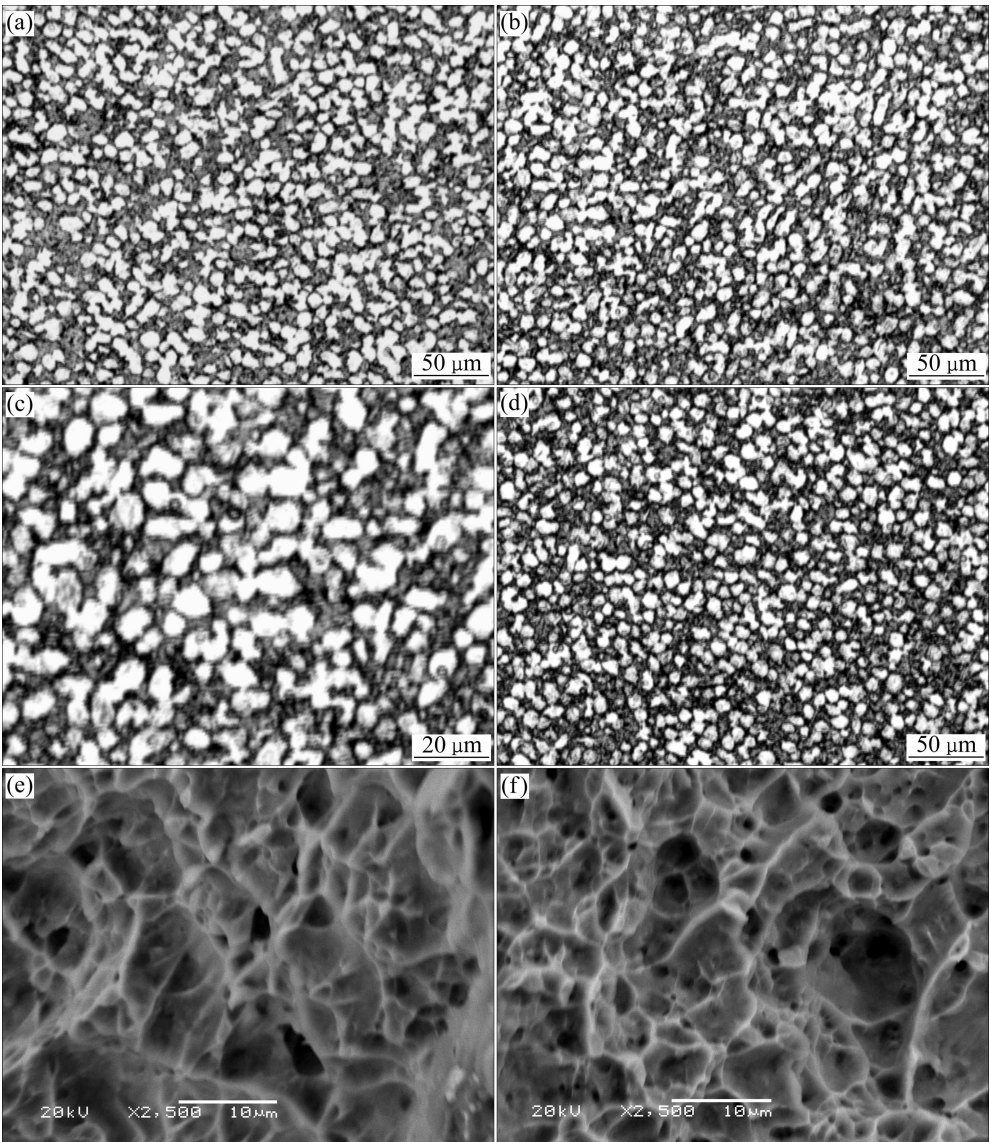


图 3 经不同温度时效处理 Ti-662 合金棒材的显微组织及断口形貌
Fig. 3 Microstructures ((a)~(d)) and fracture morphologies ((e), (f)) of Ti-662 alloy bars aged at different temperatures: (a) (580 °C, 4 h, AC); (b), (c) (600 °C, 4 h, AC); (d) (620 °C, 4 h, AC); (e) (600 °C, 4 h, AC); (f) (620 °C, 4 h, AC)

时效温度降低,析出的 α 相更弥散,从而获得更好的强化效果。亚稳态组织在时效时的分解包含马氏体相和亚稳态 β 相的分解。马氏体相的分解,是在 α 相的基体中有 β 相的析出,基体 α 相成分接近反应达到平衡时的 α 相成分。亚稳态 β 相的分解,是由于Ti-662中包含的Cu和Fe属于 β 共析型稳定剂,分解后平衡时的相组织是 $\alpha+\beta$ 和 α +化合物,进一步起到强化作用^[9]。图3(e)和(f)所示为两种时效态拉伸断口的微观形貌,均为等轴韧窝型延性断裂,大韧窝中包含有小韧窝,韧窝的深度是基材可成形性和断裂韧度的一种量度^[10],从韧窝形貌可以看出该材料时效态的塑性和韧性也是较好的。

经880℃固溶、不同时效温度热处理后Ti-662棒材合金的力学性能见表3。从表3中可以看出,时效温度较低时,强化作用较大,但塑性下降;时效温度较高时,塑性得到提高,强度却明显下降。当时效温度为600℃时,强度和塑性得到了较好的匹配。

表4所列Ti-662合金棒材固溶时效态(STA)典型产品的力学性能。室温和高温材料的纵、横方向的拉伸性能差异不大,材料各向同性较好,高温强度有所下降,塑性提高比较明显,材料的纵、横向拉伸性

表 3 Ti-662 合金棒材不同温度时效的拉伸性能

Table 3 Tensile properties of aged Ti-662 alloy bars at different temperature

Sample No.	Heat treatment process	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A_5 /%	Z /%
1	(580℃, 4 h, AC)	1 317	1 269	10.0	45.2
2	(600℃, 4 h, AC)	1 200	1 150	12.5	48.6
3	(620℃, 4 h, AC)	1 129	1 083	14.3	55.5

能都比标准下限指标高很多,强度约高100 MPa,伸长率大20%~40%。材料的室温和高温纵向冲击韧性明显优于横向的,而且差距较大,说明材料的冲击韧性各向异性非常明显,但材料的综合性能远远超出标准下限要求,整体力学性能水平良好。

对经固溶时效热处理后的棒材进行超声波探伤检测,质量级别可达到AMS 2631B中A1级,说明材料内部组织均匀,内部质量一致性良好。同时,采用扫描电镜和能谱仪对时效态棒材取样进行显微形貌观察和微区分析,固溶时效态棒材的SEM像及EDS谱见图4。由图4(a)可知,未发现有偏析等冶金缺陷,为

表 4 Ti-662 合金棒材固溶时效态典型产品的力学性能

Table 4 Mechanical properties of Ti-662 alloy bars in STA for typical products

Sample No.	Test temperature/℃	Diameter/mm	Sample direction	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A_5 /%	Z /%	A_k /J
1	25	90	L	1 193	1 138	12.0	35.5	21.0
2	25	90	T	1 186	1 136	14.0	44.6	13.9
3	205	90	L	1 000	917	17.6	56.2	37.0
4	205	90	T	1 028	904	18.0	58.0	22.6
Agreement requirements	25	83~102	L&T	≥1 103	≥1 034	≥10	—	≥9.47
	205	83~102	L&T	≥931	≥807	≥13	—	≥13.56

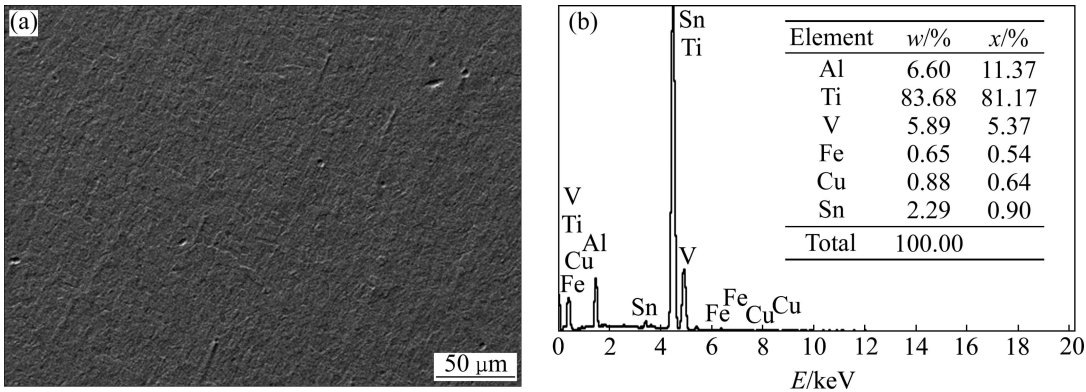


图 4 固溶时效态 Ti-662 合金棒材的 SEM 像及 EDS 谱

Fig. 4 SEM image (a) and EDS pattern (b) of as-solution treated and aged Ti-662 alloy bars

了进一步验证成分均匀性,在选定区域用能谱分析微区成分,分析结果显示除了 Al 元素含量偏高以外(可能是使用氧化铝抛光粉的影响),其他合金元素均在 MIL9047 标准要求范围之内,说明成品棒材的合金元素分布较为均匀,成分控制较好。

3 结论

1) 固溶处理对 Ti-662 合金棒材既有固溶作用,又有一定的软化作用。

2) 固溶处理后的棒材经过时效热处理后, Ti-662 合金棒材强度明显增加,塑性略有降低,而且随着时效温度升高,强化效果下降,塑性随之提高。

3) 经固溶时效后的 Ti-662 合金棒材综合性能良好,可以满足中高强高性能需求领域的使用。

REFERENCES

- [1] WOOD R A, FAVOR R J. 钛合金手册[M]. 刘静安, 吴煌良, 姚毅中, 译. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1983: 75-86.
- WOOD R A, FAVOR R J. Handbook of titanium alloy [M]. LIU Jing-an, WU Hang-liang, YAO Yi-zhong, transl. Chongqing: Chongqing Branch of Science and Technology Literature Press, 1983: 75-86.
- [2] 《稀有金属加工手册》编写组. 稀有金属材料加工手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1984: 87.
- Rare Metal Process Handbook Compiling Group. Rare metal process handbook [M]. Beijing: Metallurgical Industrial Press, 1984: 87.
- [3] 戚运莲, 杜宇, 刘伟, 洪权, 卢亚峰. 热处理温度对 TC10 钛合金棒材组织与性能的影响[J]. 钛工业进展, 2011, 28(5): 31-33.
- QI Yun-lian, DU Yu, LIU Wei, HONG Quan, LU Ya-feng. Effect of heat treatment on microstructure and properties of TC10 titanium alloys [J]. Titanium Industry Progress, 2011, 28(5): 31-33.
- [4] 陈睿博, 朱宝辉, 赵洪章, 刘彦昌, 胡晓晨, 王益, 许道玉. Ti-662 钛合金热处理工艺[J]. 金属热处理, 2013, 38(3): 97-99.
- CHEN Rui-bo, ZHU Bao-hui, ZHAO Hong-zhang, LIU Yan-chang, HU Xiao-chen, WANG Yi, XU Dao-yu. Heat treatment process of Ti-662 titanium alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2013, 38(3): 97-99.
- [5] 王晓林, 赵志龙, 张延生, 赵芳利, 毛麒, 田伟华. TC10 合金铸造缺陷在热等静压条件下的弥合机理初探[J]. 铸造, 2013, 60(8): 731-734.
- WANG Xiao-lin, ZHAO Zhi-long, ZHANG Yan-sheng, ZHAO Fang-li, MAO Lin, TIAN Wei-hua. Discussion on closing mechanism of TC10 alloy casting defects under HIP [J]. Foundry, 2013, 60(8): 731-734.
- [6] 陈国财, 杨文甲, 陈苏, 晁雷. 锻造工艺对 TC10 钛合金棒材性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): s25-s27.
- CHEN Guo-cai, YANG Wen-jia, CHEN Su, CHAO Lei. Effects of forging technics on performance of TC10 titanium alloy stick [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): s25-s27.
- [7] MATTHEW J, DONACHIE J. Titanium—A technical guide [M]. ASM International, 1988: 62-68.
- [8] 胡晓晨, 陈林, 朱宝辉, 陈睿博, 刘彦昌, 赵洪章, 王莉, 郑爱国. 变形方式和热处理工艺对 Ti-662 合金棒材组织和性能的影响[J]. 钛工业进展, 2013, 30(2): 17-20.
- HU Xiao-chen, CHEN Lin, ZHU Bao-hui, CHEN Rui-bo, LIU Yan-chang, ZHAO Hong-zhang, WANG Li, ZHENG Ai-guo. Effect of deformation mode and heat treatment on microstructures and mechanical properties of Ti-662 alloy rod [J]. Titanium Industry Progress, 2013, 30(2): 17-20.
- [9] 莫畏. 钛[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 664-668.
- MO Wei. Titanium [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008: 664-668.
- [10] ENGEL L, KLINGELE H. 金属损伤图谱[M]. 孟锡明, 译. 北京: 机械工业出版社, 1990: 29-40.
- ENGEL L, KLINGELE H. An atlas of metal damage [M]. MENG Xi-ming, transl. Beijing: China Machine Press, 1990: 29-40.

(编辑 陈卫萍)