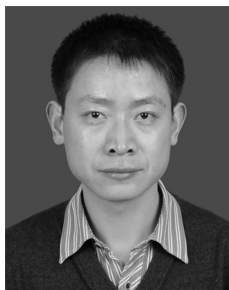


固溶工艺对 Ti12LC 合金组织性能的影响

侯智敏^{1,2}, 赵永庆^{1,2}, 张鹏省¹, 毛小南¹, 尹雁飞¹, 李思兰¹

(1. 西北有色金属研究院 钛合金研究所, 陕西 西安 710016)

(2. 西北工业大学材料学院, 陕西 西安 710072)



侯智敏

摘要: Ti12LC 合金是西北有色金属研究院研制的一种低成本钛合金, 用于取代 TC11 合金进行推广应用。本文对 $\phi 420$ mm Ti12LC 合金铸锭进行常规锻造, 得到等轴组织的 $\phi 170$ mm Ti12LC 合金棒材。采用单重固溶 + 时效、双重固溶 + 时效两种不同的工艺对 Ti12LC 合金进行热处理, 分析不同固溶工艺对 Ti12LC 合金显微组织及室温拉伸、室温冲击性能的影响。研究表明, 在相同的固溶冷却速率下, 增加单重固溶温度, 初生等轴 α 相含量减少, 合金强度增加、塑性减小、冲击韧性减小。单重固溶 + 时效热处理后合金冲击韧性低、强韧性匹配差。与单重低温固溶 + 时效相比, 合金经高温预固溶慢冷 + 低温固溶处理后, 初生 α 相尺寸及相含量变化不明显, 但可以获得更大尺寸的次生 α 相, 合金的塑性稍有降低、强度增加、冲击韧性改善明显, 综合力学性能匹配良好。

关键词: Ti12LC 合金; 双重固溶; 强韧化

中图分类号: TG156.2⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2014)08-0506-03

Effect of Solution Treatment on Microstructure and Properties of Ti12LC Alloy

HOU Zhimin^{1,2}, ZHAO Yongqing^{1,2}, ZHANG Pengsheng¹, MAO Xiaonan¹,
YIN Yanfei¹, LI Silan¹

(1. Titanium Alloy Research Center, Northwest Institute for Non-ferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

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

Abstract: The low cost Ti12LC titanium alloy was developed by Northwest Institute for Non-ferrous Metal Research to replace TC11 titanium alloy. The Ti12LC cast ingot of $\phi 420$ mm was forged by conventional process, and worked in $\phi 170$ mm equiaxed bars finally. The equiaxed Ti12LC alloys were single and duplex solution treated separately, and then aged at 540 °C for 6 h. The effects of different solution processes on the morphology and mechanical properties, especially the impact toughness were analyzed. The results show that the content of primary equiaxed α phase, the plasticity and the impact toughness decrease, but the strength of the alloy increases, when the solution temperature of $\alpha + \beta$ phase field single solution + aging heat treatments increases, for which the solution cooling rate is constant. The single solution + aging heat treated alloys have low impact toughness, which means that the impact toughness and strength are mismatched. Compared with single solution at low temperature, pre-solution at the upper $\alpha + \beta$ phase field followed by furnace cooling, and then re-solution at low temperature can result in larger dimension secondary α phase, higher strength and impact toughness, while the plasticity decreases in acceptable range, the content and dimension of primary α phase change little. The combined mechanical properties of the Ti12LC alloys heat treated by duplex solution + ageing match well.

Key words: Ti12LC alloy; duplex solution treatment; strengthen and ageen

1 前言

钛合金可广泛应用于各种武器装备, 包括军用飞机、航空发动机、导弹、各种舰艇、核反应堆、轻型火炮和装甲车辆等^[1-4]。钛合金的广泛应用对于降低军用飞机的结构质量系数, 提高航空发动机的推重比, 减轻

收稿日期: 2014-07-25

基金项目: 陕西省重点科技创新团队计划“钛合金研发创新团队”
(2012KCT-23)

第一作者及通讯作者: 侯智敏, 男, 1981年生, 博士, Email:
houzhimin1981@126.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2014.08.08

武器装备的质量, 提高装甲防护性能, 延长使用寿命, 提高核反应堆安全性和可靠性, 提高舰艇搜索、发现和跟踪能力等都具有重要的作用。然而, 长期以来成本太高, 这一制约钛合金应用的主要问题一直都没有从根本上得到解决, 因此低成本钛合金及其制备技术成为目前重要的研究热点^[5-7]。

西北有色金属研究院研制的 Ti12LC 低成本钛合金, 由于采用廉价的 FeMo 中间合金取代昂贵的 V 和 Zr 等合金元素, 其原料成本与 TC11 相比降低 10% 以上^[8], 且该合金的力学性能优于 TC11。由于性能及成本上的优势, 其完全可以替代 TC11 进行广泛的推广应用^[9]。前期的研究工作, 特别是针对热处理工艺对强韧性匹配的影响规律缺乏深入研究和讨论^[10]。本文对 Ti12LC 合金进行两种不同工艺的固溶+时效热处理, 分析了固溶工艺参数对合金显微组织、室温拉伸性能及冲击韧性的影响, 优化了合金的强韧性匹配工艺, 希望推动该合金的进一步应用。

2 实验材料与方法

首先通过 3 次真空自耗熔炼制备了 $\phi 420$ mm 吨级铸锭, 然后采用逐级降温的方法进行开坯锻造及改锻, 最终在两相区锻成 $\phi 170$ mm 的棒材, 棒材的锻态组织见图 1。如图 1 所示, 合金的显微组织由初生 α 相、细小次生 α 相及 β 基体组成。初生 α 相含量为 23%, 大部分初生 α 相呈等轴 α , 也有部分是岛状的长条状 α 相, 初生 α 相的直径/宽度约为 5 μm 。差式扫描量热法 (DSC) 测得合金 T_{β} 转变温度为 895 $^{\circ}\text{C}$ 。实验用热处理试样采用电火花线切割方法从 $\phi 170$ mm 棒材 1/2R 处切取。对样品进行不同工艺的固溶+时效热处理, 分析其对组织及力学性能的影响, 具体的热处理工艺见表 1。组织分析通过 OLYMPUS/PMG3 光学显微镜 (OEM) 进行, 金相试样抛光后, 采用 HF + HNO₃ + H₂O (体积比 1:3:10) 腐蚀液浸蚀。试样力学性能测试在 Instron 1185 力学试验机上进行。

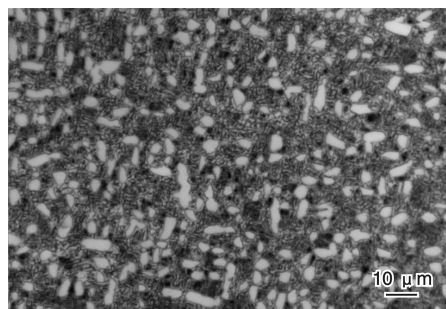


图 1 Ti12LC 合金 $\phi 170$ mm 棒材锻态组织

Fig. 1 The microstructure of Ti12LC alloy bar as-forged

表 1 Ti12LC 合金热处理工艺

Table 1 The heat treatment parameters for Ti12LC Alloy

No.	Heat treatment parameters
1 [#]	850 $^{\circ}\text{C} \times 1$ h/AC + 540 $^{\circ}\text{C} \times 6$ h/AC
2 [#]	800 $^{\circ}\text{C} \times 1$ h/AC + 540 $^{\circ}\text{C} \times 6$ h/AC
3 [#]	880 $^{\circ}\text{C} \times 1$ h/FC + 540 $^{\circ}\text{C} \times 6$ h/AC
4 [#]	880 $^{\circ}\text{C} \times 1$ h/FC + 800 $^{\circ}\text{C} \times 1$ h/AC + 540 $^{\circ}\text{C} \times 6$ h/AC

3 实验结果与分析

3.1 固溶工艺对合金显微组织的影响

3.1.1 单重固溶工艺对合金显微组织的影响

图 2 为 Ti12LC 合金经不同工艺单重固溶后的金相组织。与锻态组织相比, 单重固溶后初生 α 相有等轴化趋势, 组织更加均匀, 细小的次生 α 球消失, β 基体上的细板条状 α 相隐约可见。850 $^{\circ}\text{C}$ 高温固溶后, 初生 α 相尺寸变化不大, 球化明显, 初生 α 相含量稍有减小, 约为 19%, 见图 2a。800 $^{\circ}\text{C}$ 固溶后, 初生 α 相尺寸有一定的增加, 相含量增加, 约为 25%, 见图 2b。与高温固溶后的组织相比, 低温固溶后 α 相球化效果没有高温固溶明显, 但 β 基体上的次生 α 相更加清晰。

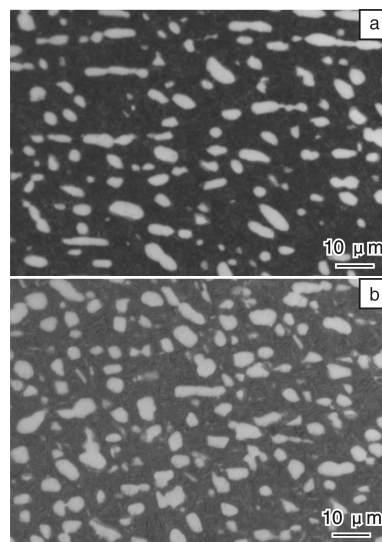


图 2 Ti12LC 合金经 1[#](a) 和 2[#](b) 热处理工艺后的金相组织

Fig. 2 Metallographs of Ti12LC heat treated with 1[#](a) and 2[#](b)

3.1.2 双重固溶工艺对合金显微组织的影响

合金在 880 $^{\circ}\text{C}$ 高温固溶炉冷后, 初生等轴 α 相尺寸稍有增加, 大量次生条状 α 相析出, 厚度约为 2 μm , 见图 3a。一定厚度的条状 α 相析出有利于改善合金的韧性, 但是慢的冷却速率会导致 α 相的过析出, 引起时效强化效果的急剧恶化。合金经高温预固溶+二次低温固溶后, 初生等轴 α 相尺寸及相含量均变化不明显, 条状次生 α 相尺寸减小, 相含量下降明显, 见图 3b。但是与单重低温固溶处理后的合金组织相比, 次生 α 相厚度增加明显, 相含量大幅增加。

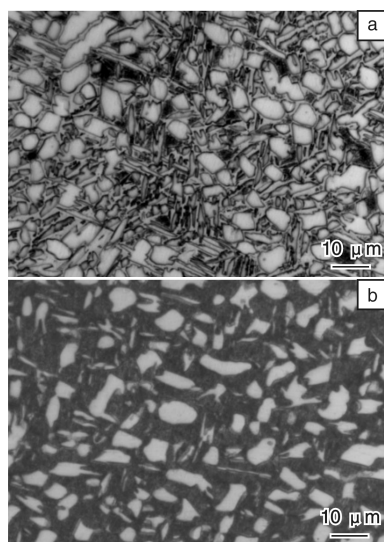


图3 Ti12LC 合金经 3[#](a) 和 4[#](b) 热处理工艺后的金相组织
Fig. 3 Metallographs of Ti12LC heat treated with 3[#](a) and 4[#](b)

3.2 固溶工艺对合金力学性能的影响

表 2 为 Ti12LC 合金经不同工艺热处理后的室温拉伸性能及冲击韧性。可以看出, 单重固溶 + 时效处理后, 较高的固溶温度可以使合金获得更好的时效强化效果, 从而获得更高的强度, 但是塑性及韧性较低。降低固溶温度可以改善合金的塑性及冲击韧性, 但对冲击韧性改善并不明显。采用 1[#] 工艺热处理后, 金相组织中只有约 20% 的初生 α 相和大量细小的次生 α 相弥散分布在 β 基体中, 时效强化效果明显, 由于次生 α 相非常细小, 导致合金的冲击韧性较差。与 1[#] 工艺相比, 采用 2[#] 工艺低温固溶后, 初生 α 相含量及尺寸均有一定的增加, 次生 α 相尺寸明显增加, 导致时效强化效果减弱。虽然初生 α 相的强化效果有一定的增加, 但整体表现为强度大幅下降, 塑性明显增加。由于只有少量小尺寸条状次生 α 相析出, 因此, 合金冲击韧性改善不明显。

表 2 经不同热处理工艺处理后的 Ti12LC 力学性能

Table 2 Mechanical properties of heat treated Ti12LC alloy

No.	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%	a_k /J · cm ⁻²
1 [#]	1 315	1 224	7.5	11	20.5
2 [#]	1 126	1 035	11.5	33	24.0
4 [#]	1 147	1 049	9.0	22	33.5

4[#] 工艺热处理后, 合金的冲击韧性明显改善, 塑性、强度介于 1[#] 工艺与 2[#] 工艺之间, 强塑性匹配较好。与 2[#] 工艺相比, 相同的最终固溶温度, 导致合金的时效强化效果相当; 一定厚度的次生 α 相析出, 其起到一定程度的强化效果, 但可以明显改善合金的韧性。3[#] 工艺热处理后, 虽然次生 α 相厚度及相含量均明显增加, 但炉冷热处理会严重削弱两相钛合金时效强化效果, 损害合金的强度^[11], 因此并不可取。4[#] 工艺热处理后合金的室温强度还有较大的调整空间, 可以通过提高固溶温

度, 进一步改善合金的塑性及韧性, 相关的研究工作有待于进一步开展。

4 结 论

(1) $\alpha + \beta$ 相区单重固溶 + 时效热处理后, Ti12LC 合金的室温拉伸性能随固溶温度的增加而增加, 塑性及冲击韧性降低, 合金的抗拉强度可以达到 1 315 MPa。

(2) $\alpha + \beta$ 相区高温预固溶炉冷 + 低温固溶 + 时效热处理后, 合金的强度、塑性介于单重高温固溶与低温固溶处理之间, 冲击韧性明显改善, 达到 33.5 J · cm⁻², 强度、塑性及韧性匹配良好。

参考文献 References

- [1] Weiss I, Semiatin S L. Thermomechanical Processing of Beta Titanium Alloys-An Overview[J]. *Materials Science Engineering A*, 1998, 243(1/2): 46-65.
- [2] Huang Zhanghong(黄张洪), Qu Henglei(曲恒磊), Deng Chao(邓超), et al. Ti6242S 钛合金锻件的组织和性能[J]. *Hot Working Technology* (热加工工艺), 2011, 40(19): 124-125.
- [3] Peng Yanping(彭艳萍), Zeng Fanchang(曾凡昌), Wang Junjie(王俊杰), et al. 国外航空钛合金的发展应用及其特点分析[J]. *Journal of Materials Engineering* (材料工程), 1997(10): 3-6.
- [4] Yan Minggao(颜鸣皋), Wu Xueren(吴学仁), Zhu Zhishou(朱知寿). 航空材料技术的发展现状与展望[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology* (航空制造技术), 2003(12): 19-25.
- [5] Wang Guo, Hui Songxiao, Ye Wenjun, et al. Hot Compressive Behavior of Ti_{3.0}Al_{3.7}Cr_{2.0}Fe_{0.1}B Titanium Alloy[J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2012(22): 2 965-2 971.
- [6] Jia Weiju(贾蔚菊), Zeng Weidong(曾卫东), Duan Fengchuan(锻凤川), et al. 退火对 Ti8LC 钛合金组织与性能的影响[J]. *Hot Working Technology* (热加工工艺), 2009, 38(12): 137-142.
- [7] Wang Guo(王国), Hui Songxiao(惠松晓), Ye Wenjun(叶文君), et al. 固溶处理对 Ti-3.0Al-2.3Cr-1.3Fe 钛合金组织与力学性能的影响[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报), 2012, 22(11): 3 015-3 021.
- [8] Zhao Yongqing(赵永庆), Wu Huan(吴欢). *A Processing Method for a Low Cost Titanium Alloy* (一种低成本钛合金的制备方法): China, 201110028440.4[P]. 2011-05-18.
- [9] Zhao Y Q, Li Y L, Wu H, et al. *Research on Low Cost Titanium Alloy*[C]//Luetjering G, Albrecht J. *Proceedings of the 10th World Conference on Titanium*. Weinheim: Wiley-VCH, 2003: 3 083-3 087.
- [10] Zhu Zhishou(朱知寿), Shang Guoqiang(商国强), Wang Xinnan(王新南), et al. 低成本高性能钛合金研究进展[J]. *Titanium Industry Progress* (钛工业进展), 2012, 29(6): 1-5.
- [11] Hou Zhimin(侯智敏), Mao Xiaonan(毛小南), Lei Wenguang(雷文光), et al. 固溶处理对近 β 锻 TC21 合金组织的影响[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报), 2010, 20(special 1): 690-694.