

钛合金组织与性能调控工程实例

张晨辉^{1,2} 张利军^{1,2} 郑筠^{1,2} 田军强^{1,2}

(1.西安超晶科技有限公司; 2.陕西省先进金属结构材料精确热成形重点实验室)

摘要 对比研究了加热温度和冷却方式对现有成熟钛合金牌号组织和力学性能的影响。结果表明,当初生 α 相数量过多、合金强度较低时,可通过增加一次高温预处理、提高退火温度或增加冷却速率等方式,有效减少合金显微组织中的初生 α 相数量,实现提高合金的抗拉强度、高温持久强度、断裂韧度的调控目的;当初生 α 相含量过低、合金塑性与冲击韧度较低时,可通过在两相区控制退火冷却速率来提高初生 α 相含量,实现提高合金的拉伸塑性、冲击韧度的调控目的。

关键词 钛合金;热处理;显微组织;力学性能

中图分类号 TG146.23 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.08.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



An Engineering Example of Microstructure and Properties Control of Titanium Alloy

Zhang Chenhui^{1,2}, Zhang Lijun^{1,2}, Zheng Yun^{1,2}, Tian Junqiang^{1,2}

(1.Xi'an Chaojing Technology Co.,Ltd.; 2.Shaanxi Key Laboratory of Advanced Metal Structural Materials Precision Thermoforming)

Abstract: The effects of heating temperature and cooling mode on microstructure and mechanical properties of mature titanium alloys were investigated. The results indicate that when the content of primary α phases is large and the strength is low, the amount of primary α phases in the microstructure of the alloy can be effectively reduced by increasing a high temperature pretreatment, annealing temperature or cooling rate, implementing the regulatory purposes of improving the tensile strength, high temperature lasting strength and fracture toughness. When the content of primary α phase is less and the plasticity and impact toughness are low, the amount of primary α phases can be increased by controlling the annealing and cooling rate in the two-phase region to achieve the regulatory purpose of improving the tensile plasticity and impact toughness.

Key Words: Titanium Alloy, Heat Treatment, Microstructure, Mechanical Properties

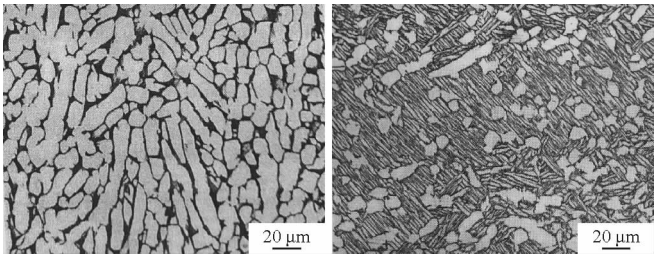
钛合金由于具有优异的耐腐蚀性、高比强度、耐高温等综合性能,在航空航天、船舶、化工、能源等行业应用广泛。随着钛合金使用范围的不断扩展,其工程化过程中会遇到各类问题。采用适当的热处理工艺来调整钛合金显微组织,最终改善其力学性能,是解决此类问题的关键^[1~4]。

1 通过加热调控钛合金组织与性能

1.1 双相钛合金组织与高温持久性能调控

某批次 TA15 钛合金锻件在 500℃下高温持久性能达不到标准要求(≥ 50 h),不同热处理状态下 TA15 钛合金锻件的显微组织和力学性能分别见图 1 和表 1。由图 1a 可以看出,TA15 钛合金锻件的显微组织几乎全部为初生 α 相。初生 α 相越多,合金的高温持久性能

则越低,因此为了提高合金的高温持久性能,需降低初生 α 相含量。对该批次 TA15 钛合金锻件进行 975℃ $\times$ 60 min 高温加热预处理(合金相变点温度为 995℃),以降低合金中的初生 α 相含量并提高合金的高温



(a) 800℃ $\times$ 1 h 退火 (b) 975℃ $\times$ 1 h 预处理+800℃ $\times$ 1 h 退火

图 1 不同热处理状态下 TA15 钛合金锻件的显微组织
Fig.1 Microstructure of TA15 titanium alloy forgings under various heat treatment conditions

收稿日期:2020-12-15;修改稿收到日期:2021-02-17
第一作者简介:张晨辉,男,1989 年出生,工程师,西安(710012),E-mail:624143206@163.com
引用格式:张晨辉,张利军,郑筠,等. 钛合金组织与性能调控工程实例[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(8):1 020-1 023.
ZHANG C H, ZHANG L J, ZHENG Y, et al. An engineering example of microstructure and properties control of titanium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(8):1 020-1 023.

持久性能。从图 1b 可以看出,经过相变点下 20 ℃的预处理,TA15 显微组织中的等轴初生 α 相含量显著降低,同时片层状次生 α 相含量比例提升。表 1 为不同热处理状态下 TA15 钛合金锻件的力学性能。可以看出,增加预处理的 TA15 钛合金锻件的抗拉强度有所提高,塑性变化不明显,但是高温持久性能(时间)显著增加,达到了标准要求。

表 1 不同热处理状态下 TA15 钛合金锻件的力学性能

Tab.1 Mechanical properties of TA15 titanium alloy forgings on various heat treatment conditions

处理制度	室温拉伸及冲击			500 ℃高温持久		
	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%	σ_s /MPa	高温持久时间/h
普通退火	959	858	13.0	34.0	470	25
	970	873	11.0	37.0	470	40
预处理+普通退火	978	866	11.0	37.0	470	>51
	979	897	13.0	49.0	470	>51
标准	≥930	≥815	≥8.0	≥20.0	470	≥50

某 TC21 钛合金锻件在进行力学性能测试时发现 500 ℃高温持久性能低于 100 h(标准要求 590 MPa 应力下持久时间长于 100 h),图 2 为 TC21 钛合金锻件的显微组织。由图 2a 可以看出,该 TC21 钛合金锻件的显微组织中初生 α 相含量较高,对于该类锻件初生 α 相含量应控制在 10%~20% 的范围内。对 TC21 钛合金锻件进行了高温加热预处理,以减少合金中的初生 α 相含量并提高合金的高温持久性能。高温预处理并经双重退火处理后的组织见图 2b。可以看出,高温预处理后 TC21 钛合金锻件显微组织中的等轴初生 α 含量显著降低,同时片层状次生 α 相含量提高且厚度减薄,高温持久测试均超过 100 h,满足了技术要求^[5]。初生 α 相含量越多,合金的高温持久性能越差,初生 α 相含量减少,合金的高温持久性能越好^[5]。双相钛合金中的初生 α 相含量过多,可以采用相变点下高温预处理的方式使其数量减少。

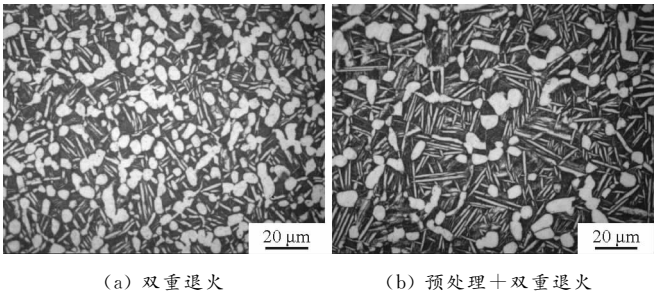


图 2 TC21 钛合金锻件显微组织

Fig.2 Microstructure of TC21 titanium alloy forgings

1.2 双相钛合金组织与室温力学性能调控

为了满足工程的需求,研究了退火温度对 TA15 钛合金力学性能的影响,多数标准推荐的 TA15 钛合金退火温度范围为 750~850 ℃,本课题选择 750、810、840

℃对试样进行 1 h 的退火处理,然后空冷,不同热处理状态下试样的力学性能见表 2。可以看出,随着退火温度的升高,TA15 钛合金的抗拉强度明显增加,伸长率变化无明显规律,断面收缩率和冲击韧度也表现出升高的趋势。

表 2 不同温度退火后的 TA15 钛合金试样力学性能

Tab.2 Mechanical properties of TA15 titanium alloy specimens annealed at different temperatures

退火温度/℃	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%	冲击韧度/(J·cm ⁻²)
750	985	932	16.5	36.0	27.7
	982	928	17.0	39.0	29.0
810	1 016	932	15.5	39.0	30.0
	1 024	933	18.0	40.0	32.8
840	1 051	960	15.5	43.0	39.0
	1 055	961	18.0	46.0	40.0

某 TA31 钛合金锻件在进行力学性能测试时,室温抗拉强度为 820 MPa,低于标准值(840 MPa)。基于 TA15 钛合金热处理经验,采取退火温度由 800 ℃提高到 850 ℃,两种退火温度对应的力学性能及显微组织分别见表 3 和图 3。由表 3 可以看出,提高退火温度处理后的 TA31 钛合金锻件室温抗拉强度明显提高,达到了标准要求。由图 3 可以看出,相对于 800 ℃,850 ℃退火后等轴初生 α 相尺寸较为细小。

表 3 不同温度退火后的 TA31 钛合金锻件力学性能

Tab.3 Mechanical properties of TA31 titanium alloy forgings annealed at different temperatures

退火工艺	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%	冲击韧度/(J·cm ⁻²)
800 ℃×1 h+空冷	844	782	14.5	49.0	62.0
	820	755	10.0	45.0	58.3
850 ℃×1 h+空冷	873	771	13.0	38.0	63.1
	890	787	15.0	42.0	52.8
标准	≥840	≥740	≥8.0	≥20.0	≥47.0

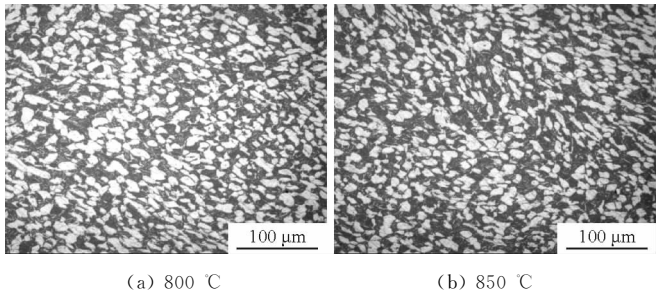


图 3 不同退火温度下 TA31 钛合金的显微组织

Fig.3 Microstructure of TA31 titanium alloy annealed at different temperatures

2 通过冷却调控钛合金组织与性能

2.1 双相钛合金组织与室温冲击性能调控

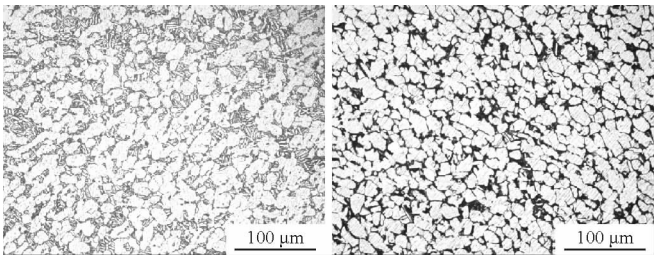
对某 TC4 钛合金饼材在进行力学性能(见表 4)测试时发现其室温冲击性能分别为 32.5、31.3 J·cm⁻²,

低于标准要求的 $39.2\text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。对饼材的冲击试样进行了组织观察,结果见图 4。表 4 为退火后不同冷却条件下的 TC4 钛合金的室温性能,发现提高双相钛合金显微组织中的初生等轴 α 含量可提高其室温塑性和冲击性能以及高周疲劳性能。由此可知,提高 TC4 饼材室温冲击性能的有效办法是提高合金显微组织中初生 α 相的含量^[6]。因此,对 TC4 钛合金锻件的退火工艺进行了调整,由 $800\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}$ 保温后直接出炉空冷的退火工艺调整为 $800\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}$ 炉冷至 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 出炉空冷的退火工艺,以提高合金显微组织中等轴 α 相的含量,进而提高合金的冲击韧度。由图 4 可以看出,高温缓冷等温退火工艺可以提高 TC4 钛合金显微组织中初生 α 相含量并改变 α 相的形貌,进而提高合金的力学性能。从表 4 也可以看出,在 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 出炉空冷后合金的冲击韧度达到了 $48.8\text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$,满足了标准要求,合金的强度虽然有所下降,但是仍高于标准要求(不小于 873 MPa)。

表 4 退火后不同冷却条件下的 TC4 钛合金室温性能

Tab.4 Room temperature properties of TC4 titanium alloy under different cooling conditions after annealing

冷却工艺	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%	冲击韧度/($\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$)
800 $^{\circ}\text{C}$ 出炉空冷	967	916	16.0	50.0	32.5
	973	928	17.0	53.0	31.3
炉冷至 600 $^{\circ}\text{C}$ 出炉	910	857	18.5	52.0	48.8
	908	855	18.0	50.0	48.8
标准	≥ 873	—	≥ 12.0	≥ 33.0	≥ 39.2



(a) 800 $^{\circ}\text{C}$ 出炉空冷 (b) 炉冷至 600 $^{\circ}\text{C}$ 出炉
图 4 TC4 钛合金饼材显微组织

Fig.4 Microstructure of TC4 titanium alloy plate

钛合金进行塑性变形时,滑移首先在个别位向因子较大的 α 相内开始,如果组织中初生 α 相多则变形能很快分散到其他 α 相中,不易造成应力集中,宏观上钛合金表现出良好的塑性和冲击韧度。通过工程试验数据可以看出,TC4 钛合金退火后的冷却速率对最终合金中初生 α 相含量的多少有着决定性的影响,可以依此调整和改善一些塑性与冲击韧度差的双相钛合金锻坯。

2.2 双相钛合金室温抗拉强度调控

工程实践数据统计表明,当 TC11 钛合金锻件的厚度超过 100 mm 以后,按照双重退火工艺处理的锻件芯部取样测试的室温抗拉强度往往低于 1 030 MPa,如双重退火处理后的某直径为 $\phi 185\text{ mm}$ 的 TC11 钛合金锻

件,其芯部取样测试的抗拉强度低于标准要求,测试数据见表 5。

表 5 $\phi 185\text{ mm}$ TC11 锻件双重退火后芯部力学性能
Tab.5 Mechanical properties of core of TC11 forgings with $\phi 185\text{ mm}$ after double annealing

热处理制度	取样位置	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%
960 $^{\circ}\text{C}\times 2\text{ h}+$ 空冷+ 530 $^{\circ}\text{C}\times 6\text{ h}+$ 空冷	芯部	1 001	918	15.0	47.0
		988	912	14.0	40.0
标准		$\geq 1\ 030$	≥ 910	≥ 8	≥ 23

俄罗斯钛合金手册介绍对于厚度大于 100 mm 的 BT9(中国牌号 TC11)钛合金锻件推荐使用淬火时效工艺进行热处理,以保证强度在一定的范围内不降低,但是相应的合金长时间工作温度降低 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[7]。为此,按照俄罗斯钛合金手册推荐的淬火时效热处理工艺(实质上是首次加热后的冷却方式不同而已)对该规格的锻件进行了热处理,解剖后分别在其近表面、1/2 半径、芯部取样测试了力学性能,见表 6。测试数据表明,该锻件经过淬火时效工艺处理后,其芯部抗拉强度达到了 1 070 MPa、1 081 MPa,不但满足了标准要求的 1 030 MPa,同时合金的伸长率、断面收缩率也保持在较高的范围内。

表 6 $\phi 185\text{ mm}$ 规格 TC11 锻件淬火时效后不同位置力学性能
Tab.6 Mechanical properties of TC11 forgings with $\phi 185\text{ mm}$ at different positions after quenching and aging

热处理制度	取样位置	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%
960 $^{\circ}\text{C}\times 120\text{ min}+$ 水冷+530 $^{\circ}\text{C}\times$ 360 min+空冷	近表面	1 137	986	16.0	39.0
		1 129	981	12.5	42.0
	1/2 半径	1 111	957	15.5	42.0
		1 088	934	13.0	46.0
	芯部	1 070	930	15.0	49.0
		1 081	939	15.0	44.0
	标准	$\geq 1\ 030$	≥ 910	≥ 8	≥ 23

TC11 钛合金首次加热后采用水冷,可将高温状态下更多的 β 相保留至室温,在随后的时效过程中不稳定 β 相的分解为次生板条 α 相和残留 β 基体,次生板条 α 相主要对提高合金强度有利,即板条 α 相的数量越多合金强度越高,同时残留的 β 基体对塑性有利,相对较多的残留的 β 基体又使得合金的塑性不降低,这也是 TC11 钛合金采用淬火时效工艺处理后较双重退火工艺抗拉强度显著提升、塑性无明显变化的机理所在。通过试验可知,对于强度设计要求较高、且截面厚度超过 100 mm 的 TC11 钛合金,可以适当选择淬火时效工艺处理。

3 结 论

双相钛合金的力学性能与其初生 α 相的数量和形态有密切关系。一般地,初生 α 相的数量越多,合金室

再生 7050 铝合金热处理工艺研究

韦修勋 陈愿情 贾桂龙 何克准 郑 许 谭自盟
(广西南南铝加工有限公司,广西铝合金材料与加工重点实验室)

摘 要 利用光学显微镜、直读光谱仪、万能试验机等手段,研究了再生 7050 铝合金铸锭均匀化热处理、板材固溶及时效处理工艺。结果表明,再生 7050 铝合金中主元素 Cu、Mg、Zn 偏析率均保持在 8% 以下,低倍组织无裂纹、气孔等铸造缺陷;铸锭经 470 ℃×20 h 的均匀化热处理后,晶界处非平衡凝固条件下形成的共晶组织消失;板材经过 475 ℃×0.5 h 的固溶处理后,晶界处第二相回溶较彻底,伸长率达到 34%;再经过 120 ℃×24 h 的时效处理后,晶内弥散析出颗粒状析出相,板材的力学性能达到最高,其中抗拉强度为 608 MPa、屈服强度为 539 MPa,同时伸长率为 17.5%。

关键词 再生铝合金;7050 铝合金;热处理

中图分类号 TG146.21;TG156 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.08.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Heat Treatment Process of Recycled 7050 Aluminum Alloy

Wei Xiuxun, Chen Yuanqing, Jia Guilong, He Kezhun, Zheng Xu, Tan Zimeng
(Guangxi Key Laboratory of Materials and Processes of Aluminum Alloys,
Guangxi Alnan Aluminium Fabrication Co., Ltd.)

Abstract: The homogenization heat treatment for ingots, solid solution and aging treatment for plate of recycled 7050 aluminum alloy were investigated by optical microscope, direct reading spectrometer, universal testing machine and other experimental methods. The results indicate that the segregation rates of the main elements Cu, Mg, and Zn in the recycled 7050 aluminum alloy remains below 8%, absence of casting defects including cracks and pores in the macrostructure. After homogenization heat treatment of the ingots at 470 ℃ for 20 h, eutectic structure generated under non-equilibrium solidification conditions at the grain boundary disappears. After solution treatment of the plate at 475 ℃ for 0.5 h, the second phases at grain boundary are completely dissolved, where the elongation reaches 34%. Then after aging treatment at 120 ℃ for 24 h, granular precipitates are precipitated dispersedly in the grains, and the mechanical properties of plate present satisfied effect, where the tensile strength, yield strength and elongation reach 608 MPa, 539 MPa and 17.5%, respectively.

Key Words: Recycled Aluminum Alloy, 7050 Aluminum Alloy, Heat Treatment

收稿日期:2021-01-25;修改稿收到日期:2021-03-02

基金项目:南宁市青年科技创新创业人才培育资助项目(RC20180101)

第一作者简介:韦修勋,男,1982 年出生,工程师,南宁(530031),E-mail:weixiuxun8@126.com

通信作者:陈愿情,女,1986 年出生,高级工程师,南宁(530031),E-mail:chenyuanqingyu@yeah.net

引用格式:韦修勋,陈愿情,贾桂龙,等.再生 7050 铝合金热处理工艺研究[J].特种铸造及有色合金,2021,41(8):1 023-1 027.

WEI X X, CHEN Y Q, JIA G L, et al. Heat treatment process of recycled 7050 aluminum alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(8):1 023-1 027.

温拉伸塑性、冲击韧度和高周疲劳性能越好;初生 α 相的数量越少,则合金高温持久、蠕变和断裂韧性越好。当初生 α 相数量过多、合金强度较低时,可通过增加一次高温预处理、提高退火温度或增加冷却速率等方式,有效减少合金显微组织中的初生 α 相数量,实现提高合金的抗拉强度、高温持久强度、断裂韧性的调控目的;当初生 α 相含量过低、合金塑性与冲击韧度较低时,可通过在两相区控制退火冷却速率来提高初生 α 相含量,实现提高合金的拉伸塑性、冲击韧度的调控目的。

参 考 文 献

[1] 常辉,廖志谦,王向东.海洋工程钛金属材料[M].北京:化学工业

出版社,2017.

[2] 林翠,杜楠.钛合金选用与设计[M].北京:化学工业出版社,2014.
[3] 王向明,刘文琰.飞机钛合金结构设计与应用[M].北京:国防工业出版社,2010.
[4] 王金友,葛志明,周彦邦.航空用钛合金[M].上海:上海科学技术出版社,1985.
[5] 张宝昌.有色金属及其热处理[M].西安:西北工业大学出版社,1993.
[6] 《中国航空材料手册》编委会.中国航空材料手册[M].北京:中国标准出版社,2001.
[7] 瓦力金 N.莫依谢耶夫.钛合金在俄罗斯飞机及航空航天上的应用[M].董宝明,张胜,郭德伦,等译.北京:航空工业出版社,2008.

(编辑:刘晨辉)