

冷轧加工率和热处理制度对超塑用 TC4 板材组织和性能的影响

Effect of Cold Rolling Reduction and Heat Treatment on Microstructure and Property of TC4 Plate for Super-Plastic Deformation

宝鸡钛业股份有限公司 张智鑫 庞洪 陈海涛 王红武

[摘要] 通过观察和测试不同冷轧和热处理工艺超塑用 TC4 板材的组织 and 力学性能,研究了冷轧加工率和热处理温度对 TC4 钛合金组织和性能的影响,优化了 TC4 板材的显微组织并测试了其超塑性能。研究表明:增加冷轧加工率,840~860℃热处理,有利于超塑用 TC4 板材得到均匀、无畸变、细小的再结晶组织,其室温强度可达到 1060~1048MPa,延伸率为 18%~18.5%;经组织优化后的超塑 TC4 板材在 870℃,应变速率为 $2.4 \times 10^{-3}/s^{-1}$ 时,延伸率可达到 894%。

关键词: TC4 钛合金 冷轧加工率 热处理 显微组织 超塑性

[ABSTRACT] Effect of cold rolling reduction and heat treatment on microstructure and mechanical property of TC4 titanium sheet is studied through observing and testing the microstructure and property of TC4 plates with different cold rolling and heat treatment processes. The microstructure of TC4 is optimizing, and the super-plastic property of TC4 plates is tested. The result shows that uniform, non-distorted and fine microstructures of TC4 plates are obtained by increasing cold rolling reduction and annealing at 840~860 °C. Its strength can reach to 1060~1048MPa, and its elongation can reach to 18%~18.5%. In the parameters of 870 °C and strain rate $2.4 \times 10^{-3}/s^{-1}$, the elongation of microstructure optimized TC4 plates can reach to 894%.

Keywords: TC4 titanium alloy plate Cold rolling reduction Heat treatment Microstructure Super-plastic property

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.17.107

TC4 钛合金属于 $\alpha + \beta$ 两相钛合金,与其他两相钛合金一样具有较高的比强度和热强性,较好的综合力学性能和耐蚀性,以及良好的生物相容性,在航空航天航海领域和医学领域得到广泛应用。TC4 钛合金在室温下塑性较低、变形困难,其应用曾一度受到限制。研

究表明,超塑用 TC4 钛合金在温度范围为 850~950℃,应变速率范围为 $10^{-4} \sim 10^{-2}/s^{-1}$ 时,呈现良好的超塑性^[1]。利用材料的超塑性可以成形在常温条件下无法成形的零件,即超塑成形。但批量生产的超塑用 TC4 钛合金板材显微组织中往往存在高应力组织、畸变组织、拉长组织或大块组织等组织缺陷,这些缺陷不仅会降低结构件的强度、塑性和疲劳强度等性能,还会严重影响 TC4 板材的超塑成形^[2]。因此,研究 TC4 钛合金板材的退火工艺,优化退火态组织,对超塑 TC4 板材的推广和应用有重要意义。

本试验通过控制冷轧加工率和调整再结晶退火制度,对超塑用 TC4 板材进行晶粒细化、等轴化、室温力学性能优化以及超塑性能研究。

2 试验方法

本试验用真空自耗电弧炉 3 次熔炼 TC4 钛合金铸锭,其 β 转变温度为 985~995℃,具体化学成分见表 1。铸锭经 3150t 锻造机锻成板坯,板坯经 1200mm 四辊可逆式热轧轧制并退火后,在 1200mm 四辊可逆式冷轧机进行 18% 和 30% 不同冷轧加工率加工,成品退火后测试其性能优化工艺,并测试优化后 TC4 板材的超塑性能。

表1 TC4合金锭的化学成分(质量分数) %

元素	Ti	Al	V	Fe	O	C	N	Y
含量	bal.	6.3	4.13	0.1	0.04	0.01	0.01	< 0.005
	bal.	6.27	4.19	0.1	0.05	0.02	< 0.01	

材料显微组织在 Axiovert200MAT 光学显微镜下观测,力学性能在 Instron5885 拉伸试验机上进行测试。

3 结果讨论

3.1 两种冷轧加工率 TC4 板材组织对比

经 18% 和 30% 不同冷轧加工率轧制成板材,分别观察硬态组织和 820℃保温 60min 退火态组织,如图 1、2 所示。

从图1可以看出增加冷轧加工率至30%,板材微观组织拉长破碎明显(见图1(b)),这种组织形变储能大,畸变组织多,有利于再结晶形核,退火后易得到细小均匀组织。图2为两种冷轧加工率板材相应的再结晶退火组织,平均晶粒尺寸分别为 $4.7\mu\text{m}$ 和 $3.3\mu\text{m}$ 。从形貌上看,两者均由 α 相和 β 基体组成图,其中图2(b) α 晶粒更加细小、均匀。

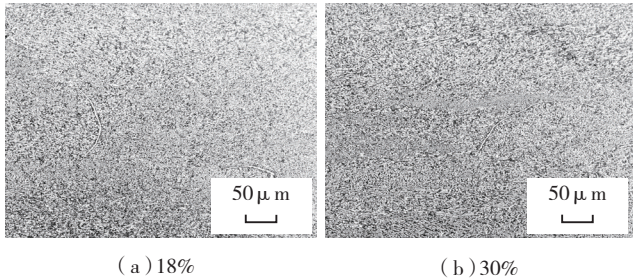


图1 不同冷轧加工率TC4板材的硬态显微组织

Fig.1 Microstructures of cold rolling plates with different deformation

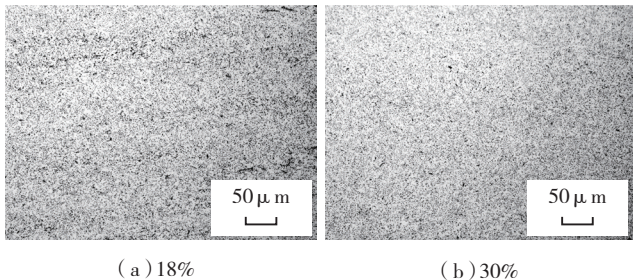


图2 不同冷轧加工率TC4板材820°C保温60min退火显微组织

Fig.2 Microstructures of plates annealed at 820°C for 60min with different cold rolling deformation

综上,说明增加冷轧加工率至30%,有利于得到细小均匀的再结晶组织。而细小、等轴和稳定的组织有利于提高材料的超塑性,晶粒尺寸对超塑性影响很大^[3]。

3.2 不同退火工艺 TC4 板材组织和性能优化

选择经30%大加工率轧制TC4板材进行退火试验。本试验以 20°C 为间隔, $820\sim 940^\circ\text{C}$ 保温60min退火,观察各退火制度下显微组织和晶粒尺寸,如图3所示。

从图3(a)~(g)可以看出,在相同退火时间下,随着温度的升高TC4板材的组织逐渐均匀化、等轴化,拉长畸变组织逐渐减少,晶粒尺寸从 $3.3\mu\text{m}$ 逐渐增大至 $6.2\mu\text{m}$,但保持在超塑成形所需的晶粒尺寸($\leq 10\mu\text{m}$)范围内^[4],如图3(h)。从相组成上看,随着温度升高, β 相逐渐增多, α 相逐渐减少,次生 α 相逐渐形成。 820°C 退火时 β 相弥散分布,尺寸较小; 940°C 退火时 β 相增多, α 相减少,次生片状 α 相明显增多,初生 α 晶粒等轴化程度提高。

为了获得良好的超塑性,综合考虑晶粒尺寸和组织均匀性,得出 $840\sim 880^\circ\text{C}$ 退火组织均匀性好,无残余冷

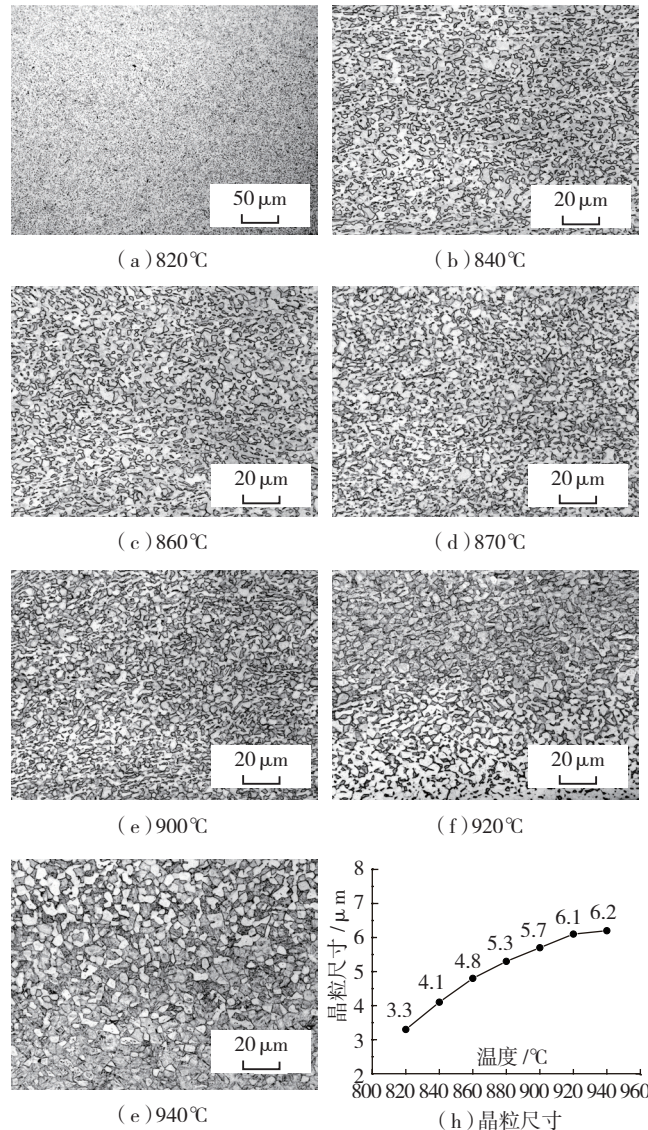


图3 经不同温度退火保温60min的TC4板材的纵向显微组织

Fig.3 Longitudinal-direction microstructures of TC4 plates annealed at different temperatures for 60min

加工畸变组织,晶粒尺寸为 $4.1\sim 5.3\mu\text{m}$,晶粒尺寸较小。这主要是因为超塑变形不同于一般金属塑性变形,晶内滑移、孪晶等塑性变形机制对总变形量贡献很小,而主要变形方式是晶界行为,所以数量多而短的晶粒边界和平坦的界面有利于变形流动,减小组织内部剪切阻力^[5]。

图4为不同温度保温60min退火后TC4板材的室温力学性能。退火温度在 $820\sim 860^\circ\text{C}$ 范围时,强度逐渐减小但变化不大,延伸率略有提高,主要是因为温度升高使 α 组织均匀化、等轴化, α 晶粒尺寸逐渐增大,细晶强化减弱,强度下降。当退火温度升至 880°C 时,强度迅速增加,延伸率迅速降低,主要是因为次生 α 增多,片层 α 厚度和有序度增加,导致材料强度提高塑性下降^[6]。当退火温度达到 900°C 时材料发生脆性断裂,这主要是因为高温退火使 β 相占主导,空冷后室温非

平衡组织增多,材料脆化。

3.3 TC4 板材超塑性

通过对超塑 TC4 板材进行冷轧加工率和组织优化,选择工艺优化后的板材(26.3%冷变形+860℃/60min退火)进行超塑性性能测试,试验条件为:870℃,应变速率 $\varepsilon = 2.4 \times 10^{-3}/s$ 。

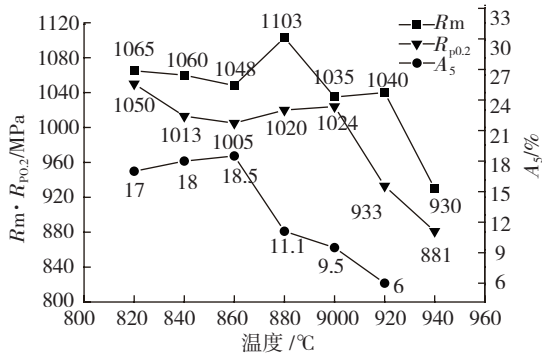


图4 TC4板材的力学性能与退火温度的关系曲线

Fig.4 Dependence of TC4 mechanical property on annealing temperature

表2 TC4板材的超塑性性能

温度 / °C	应变速率 / (s^{-1})	流变应力 σ / MPa	延伸率 δ / %
870	2.4×10^{-3}	14.06	894

4 结论

(1) 增加冷轧加工率,经840~880℃退火,有利于超塑用TC4板材得到均匀、无畸变、细小的再结晶组织,晶粒尺寸为4.1~5.3 μm 。(2) 在820~860℃保温1h热处理,超塑用TC4板材的室温良好,强度为1065~1048MPa,延伸率为17%~18.5%。(3) 大冷轧加工率和中高温热处理后,超塑TC4板材在870℃,应变速率为 $2.4 \times 10^{-3}/s$ 时,延伸率可达到894%。

参考文献

- [1] 李瑞婷,郭伟,朱颖. TC4钛合金超塑成形研究现状及其发展展望. 航空制造技术, 2012(15):91-93.
- [2] 王敏,郭鸿镇. TC4钛合金晶粒细化及超塑性研究. 塑性工程学报, 2008, 15(4):155-159.
- [3] Suh S D, Zong Y Y, Shan D B. Hot deformation behavior and microstructure evolution of TC4 titanium alloy. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010(20):2181-2184.
- [4] 朱桂双,宗影影,单德彬. 晶粒尺寸对TC4钛合金高温变形行为的影响 // 第三届国际塑性加工先进及时研讨会论文集. 南昌: 中国机械工程学会塑性工程学会, 2007.
- [5] 吴诗焯. 金属超塑性变形理论. 北京: 国防工业出版社, 1997:37-39.
- [6] 薛强,彭雯雯,曾卫东. α 形态与含量对TA15钛合金力学性能的影响. 钛工业进展, 2015, 32(2):14-15. (责编 谷雨)

(上接第106页)

束激光焊TC4合金T形接头焊缝区和热影响区均存在钛马氏体,钛马氏体是一种硬脆相,对合金有一定的强化作用^[11]。因此,T形接头焊缝区的拉伸强度高于母材,母材是整个接头的薄弱环节。但钛马氏体作为置换式过饱和固溶体,其对合金的强化作用较小,因此,与母材相比,焊缝区强度增加不超过5%。

3 结论

(1) 采用双光束激光焊接TC4合金T形接头,焊缝成形良好,焊缝形状为近似扇环形。与蒙皮侧相比,加强筋侧焊缝区略窄,而热影响区略宽。

(2) T形接头母材显微组织为 $\alpha + \beta$ 等轴组织;焊缝区显微组织由粗大的 β 柱状晶和柱状晶内快冷形成的网篮状马氏体组成,蒙皮侧焊缝区内柱状晶和马氏体晶粒比加强筋侧细小;热影响区组织由细小的针状马氏体、针状 α 相和少量等轴 α 相组成。

(3) 母材、焊缝区和T形焊接接头的拉伸强度分别为1088MPa、1112MPa和1086MPa。焊缝区拉伸强度高于母材。

参考文献

- [1] 王向明,刘文斑. 飞机钛合金结构的设计与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [2] Neye G, Heider P. Laser beam welding of modern Al-alloy for the aircraft industry. Proc. Conf. ECLAT' 94/Dusseldorf: Deutscher Verband für Schweißtechnik, 1994: 108-117.
- [3] Mendez P F, Eagar T W. Welding process for aeronautics. Adv Mater Process, 2001, 159(5): 39-43.
- [4] Dtrich D, Standfuss J, Liebacher L, et al. Laser beam welding of hard to weld Al alloys for a regional aircraft fuselage design—first results. Phys Procedia, 2011, 12(1): 113-122.
- [5] Prisco A, Troiano G, Acerra F, et al. LBW of similar and dissimilar skin-stringer joints. Part I: Process optimization and mechanical characterization. Adv Mater Res, 2008, 38: 306-319.
- [6] Squillace A, Prisco U. Influence of filler material on micro- and macro-mechanical behaviour of laser-beam-welded T-joint for aerospace applications. Mat Res, 2013, 16(5): 1106-1112.
- [7] YANG A B, TAO W, LI L Q, et al. Double-sided laser beam welded T-joints for aluminum aircraft fuselage panels: Process, microstructure, and mechanical properties. Materials and Design, 2012, 33: 652-658.
- [8] 杨志斌,陶汪,李俐群,等. T型接头双侧激光同步焊接缺陷补焊工艺及性能. 中国激光, 2013, 40(2): 1-6.
- [9] TAO W, YANG Z B, CHEN Y B, et al. Double-sided fiber laser beam welding process of T-joints for aluminum aircraft fuselage panels: Filler wire melting behavior, process stability, and their effects on porosity defects. Optics & Laser Technology, 2013, 52: 1-9.
- [10] HB5143-96. 金属室温拉伸试验方法, 1996.
- [11] 张翥,王群骄,莫畏. 钛的金属学和热处理. 北京: 冶金工业出版社, 2009. (责编 玲犀)