

热连轧工艺制备 TC4 钛合金无缝管材组织及力学性能研究

屈磊¹, 辛社伟¹, 李婷¹, 杜宇², 邹磊¹, 应扬¹, 郭荻子¹, 王晓¹

(1. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

(2. 西安秦钛智造科技有限公司, 陕西 西安 710016)

摘要: 采用热连轧机组制备出 $\phi 108 \text{ mm} \times 14.5 \text{ mm} \times L$ 的 TC4 钛合金无缝管材, 测试分析了管材热处理前后的显微组织和力学性能。结果表明: 热连轧工艺生产的 TC4 钛合金无缝管材力学性能优良, 组织呈现变形的过渡组织形貌, 主要由大量扭曲变形的片层状 α 相以及未完全破碎的 β 晶界组成。经热处理后, 组织形貌均匀, 晶内片层 α 相变为棒状 α 相, 晶界 α 相发生再结晶形成球状 α 相。TC4 钛合金无缝管材经固溶时效处理后力学性能得到提升, 其 $R_m \geq 995 \text{ MPa}$, $R_{p0.2} \geq 931 \text{ MPa}$, $A \geq 15\%$ 。

关键词: 钛合金; 热连轧; 无缝管材; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TC337.6; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2022)05-013-04

Study on Microstructure and Mechanical Properties of TC4 Titanium Alloy Seamless Pipe by Hot Continuous Rolling Process

Qu Lei¹, Xin Shewei¹, Li Ting¹, Du Yu², Zou Lei¹, Ying Yang¹, Guo Dizi¹, Wang Xiao¹

(1. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

(2. Xi'an QinTi Intelligent Manufacturing Technologies Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

Abstract: TC4 titanium alloy seamless pipe with $\phi 108 \text{ mm} \times 14.5 \text{ mm} \times L$ was prepared by hot continuous rolling mill. The microstructure and mechanical properties of pipe were analyzed. The results show that the TC4 titanium alloy seamless pipe produced by hot continuous rolling process has fine mechanical properties, and the microstructure of the pipe shows deformed transitional microstructure, which is mainly composed of a large number of distorted lamellar α phase and β grain boundaries that are not completely broken. After heat treatment, the microstructure of the pipe is uniform, the intra-crystalline lamellar α phase become rod-like α phase, the grain boundary α phase recrystallized and spheroidized to form globular α phase. The mechanical properties of TC4 titanium alloy seamless pipe are improved by solution aging treatment, with $R_m \geq 995 \text{ MPa}$, $R_{p0.2} \geq 931 \text{ MPa}$ and $A \geq 15\%$.

Key words: titanium alloy; hot continuous rolling; seamless pipe; microstructure; mechanical property

近年来, 随着我国钛冶炼技术的提高和钛合金生产系统的改善, 钛合金管材质量不断提高, 成本有效降低, 推动了其市场需求^[1]。据中国有色金属工业协会钛锆铅分会统计, 我国钛加工材产量已连续7年增长, 2021年我国生产各类钛加工材135 941 t, 同比增长40.1%, 其中管材产量为15 402 t, 同比增

长62.3%, 占全年钛加工材产量的11.3%^[2]。相对传统钢管、不锈钢管、铜合金管等, 钛合金管材的耐腐蚀性更好、比强度更高, 被大量应用于化工、海洋工程、核电、舰船及航空航天等领域^[3-5]。

目前, 钛合金管材的制造工艺已经较为成熟。管坯制造工艺主要有钻孔挤压和斜轧穿孔, 再通过轧制、拉拔、旋压等方法制备出不同规格和用途的成品管材^[6]。此类方法存在工艺流程长、成材率低、难以获得超长管材等缺点, 且成本较高^[6-9]。2000年以来, 现代热连轧管机组的穿孔、轧管和定(减)

收稿日期: 2022-07-14

基金项目: 装备预先研究项目(41422060206); 陕西省重点研发计划项目(2022GY-213)

通信作者: 屈磊(1986—), 男, 工程师。

径工序在技术装备上取得了长足发展,例如穿孔机由过去的桶式(曼式)和带导盘桶式穿孔机发展到现在的锥形辊(菌式)穿孔机;在轧管方面由过去的7~8机架、二辊全浮动芯棒或限动芯棒连轧管工艺发展到现在的5~6机架、三辊与二辊限动芯棒连轧管工艺;在定(减)径方面由过去的定(减)径发展到现在的三辊张力减径机。热连轧管机组以其生产效率高、产品质量好、金属收得率高等特点,成为世界无缝钢管主要生产企业的首选机型^[10]。目前,热连轧管机组已成为我国热轧无缝钢管生产的第一主力机型,产能约占51%,可生产规格为 $\phi(38\sim 460)$ mm $\times(3.0\sim 40.0)$ mm的钢管,主要品种有油井管、高压锅炉管和管线管等专用管材^[11]。高强度特种钢管的热连轧工业化生产现已完全成熟,有效解决了高强低塑性管材的内部缺陷问题,为中高强度钛合金管材的大规模批量生产奠定了基础。但鲜有此工艺用于制备TC4钛合金管材的报道。

本研究采用热连轧管机组,通过穿孔、轧管和定(减)径工序的工业化流水线式的热连轧工艺实现TC4钛合金无缝钢管的批量生产,并对热连轧管材的组织性能进行分析,以期进一步缩短管材的加工程序,提高材料利用率,降低中高强度钛合金无缝钢管的生产成本。

1 实验

选用西北有色金属研究院生产的 $\phi 200$ mm TC4钛合金棒坯(相变点为 $983\text{ }^{\circ}\text{C}$),在 $1080\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热2 h后,通过热连轧机组的穿孔、轧管和定(减)径工序实现工业化流水线式生产,获得规格为 $\phi 108\text{ mm}\times 14.5\text{ mm}\times L$ 的无缝钢管。对热轧无缝钢管进行 $920\text{ }^{\circ}\text{C}/2\text{ h}/\text{AC}+520\text{ }^{\circ}\text{C}/6\text{ h}/\text{AC}$ 热处理。

沿TC4钛合金无缝钢管横向和纵向切取金相试样,采用Olympus PMG3光学显微镜观察显微组织。如图1所示,在无缝钢管头部至尾部选取5个位置,各位置沿无缝钢管周向每 90° 切取拉伸试样。采用Instron 1185试验机进行室温拉伸性能测试。

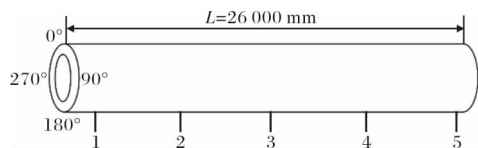


图1 TC4钛合金无缝钢管取样位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling location of TC4 titanium alloy seamless pipe

2 结果与讨论

2.1 热轧态无缝管材显微组织

图2为热轧态TC4钛合金无缝钢管横向及纵向的显微组织。由图2可见,热连轧后无缝钢管的横向组织主要由大量扭曲的片层状 α 相以及少量未完全破碎的 β 晶界组成。纵向组织晶内 α 片层呈网篮状交织形貌, β 晶界被破碎且部分区域呈球状,整体形貌呈现为扭曲变形的过渡组织形态。

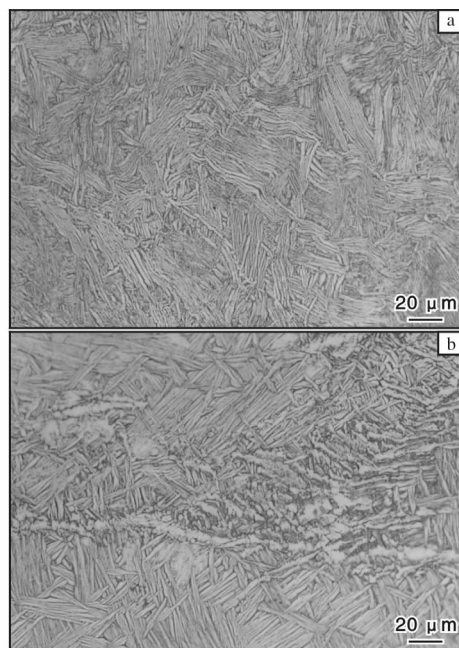


图2 热轧态TC4钛合金无缝钢管的显微组织

Fig. 2 Microstructures of TC4 titanium alloy seamless pipe as hot rolled: (a) transverse section; (b) longitudinal section

热轧态TC4钛合金无缝钢管变形组织形成原因在于合金坯料斜轧穿孔起始温度超过合金相变点约 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$,加之变形热的作用,致使管坯斜轧穿孔和热轧变形温度高于相变点,管坯呈现 β 单相区变形组织,粗大的片层组织在加工过程中变形、扭曲,冷却后形成取向混乱的 α 片, β 晶界被一定程度破碎。同时,热成形过程中晶界处发生了动态再结晶,冷却后形成了更为细小的等轴 α 相和细小 α 片。整个热连轧过程坯料变形量较大, β 晶粒尺寸不大,且 β 晶界被破碎呈不连续分布,晶内片状 α 相较细,这种组织有利于提高管材的综合性能。

2.2 热轧态无缝管材力学性能

表1为热轧态TC4钛合金无缝钢管不同部位的

拉伸性能。从表 1 可以看出，无缝管材抗拉强度 ≥ 926 MPa，屈服强度 ≥ 810 MPa，延伸率 $\geq 12.5\%$ ，力学性能良好。同时，沿无缝管材周向不同位置取样测试结果相近，证明无缝管材在热加工过程中旋转拉伸时受力变形均匀，各位置组织状态相似。热轧态无缝管材为破碎变形组织，内部存在交错的条状 α 相，这种排列方式的 α 相会阻碍位错滑移，增大合金的变形抗力而使得其强度略高于其他状态的组织，但组织内的 α/α 相界和 α/β 相界数量较多，容易形成微裂纹的形核质点，局部应力会诱发位错塞积，从而导致其塑性相对较低。

表 1 热轧态 TC4 钛合金无缝管材不同部位的室温拉伸性能

Table 1 Room temperature tensile properties in different positions of TC4 titanium alloy seamless pipe as hot rolled

Position	Angle	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A/%	Z/%
1	0°	977	888	14.0	39
	90°	983	889	14.0	34
	180°	980	886	14.0	41
	270°	982	896	14.0	36
2	0°	949	854	13.5	39
	90°	944	835	15.5	42
	180°	953	853	14.5	44
	270°	955	847	15.0	39
3	0°	943	826	13.5	40
	90°	945	827	12.5	38
	180°	940	830	14.5	39
	270°	946	826	13.0	35
4	0°	952	838	13.5	41
	90°	966	846	14.0	42
	180°	975	856	14.5	41
	270°	963	848	13.5	39
5	0°	926	810	14.0	41
	90°	928	819	16.0	42
	180°	932	816	13.0	40
	270°	937	824	14.0	42

2.3 热处理态无缝管材显微组织

图 3 为 TC4 钛合金无缝管材经 $920\text{ }^\circ\text{C}/2\text{ h}/\text{AC} + 520\text{ }^\circ\text{C}/6\text{ h}/\text{AC}$ 固溶时效热处理后的横向、纵向显微组织。从图 3 可以看出，经热处理后，无缝管材组织由热轧态的不均匀变形组织(图 2)变为了比较均匀的组织，晶内 α 相长大，由不规则扭曲的 α 片层

变为条棒状，晶界 α 相发生再结晶形成球状 α 相，无连续晶界。固溶时效处理显著改善了无缝管材的组织均匀性。

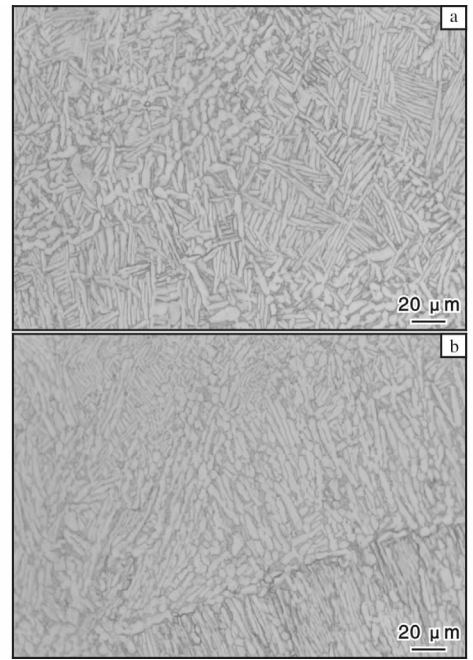


图 3 TC4 钛合金无缝管材热处理后的显微组织

Fig. 3 Microstructures of TC4 titanium alloy seamless pipe after heat treatment: (a) transverse section; (b) longitudinal section

2.4 热处理态无缝管材力学性能

图 4 为 TC4 钛合金无缝管材的室温拉伸性能。从图 4 可以看出，热处理后无缝管材的抗拉强度 ≥ 995 MPa，屈服强度 ≥ 931 MPa，延伸率 $\geq 15\%$ ，相比热轧态明显提升，综合性能优异。同时，热连轧 TC4 钛合金无缝管材的力学性能指标明显优于传统锻造挤压工艺制造的 TC4 钛合金管材^[12]。

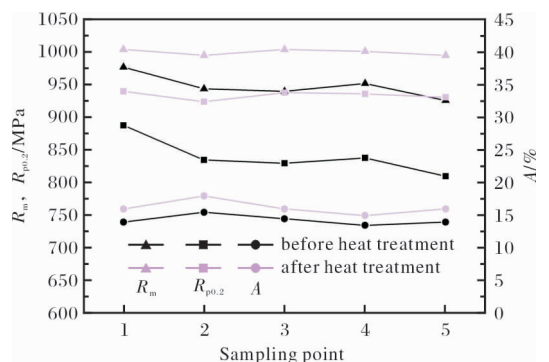


图 4 TC4 钛合金无缝管材的室温拉伸性能

Fig. 4 Room temperature tensile properties of TC4 titanium alloy seamless pipe

采用工业化流水线式的热连轧工艺制备 TC4 钛合金无缝管材, 相较钻孔挤压工艺制备中高强钛合金管材, 无需去芯棒, 材料损耗少, 同时生产效率高, 综合成本显著降低。

3 结论

(1) 采用热连轧工艺制备出规格为 $\phi 108 \text{ mm} \times 14.5 \text{ mm} \times L$ 的 TC4 钛合金无缝管材。与传统钻孔挤压工艺相比, 该工艺无需去芯棒, 具有材料损耗少、生产效率高、成本低等特点。

(2) 热轧态 TC4 钛合金无缝管材的综合力学性能良好, 组织主要由大量扭曲变形的片层状 α 相以及未完全破碎的 β 晶界组成, 整体呈现为扭曲变形的过渡组织形态。

(3) 经固溶时效热处理后, TC4 钛合金无缝管材组织中不规则扭曲的 α 片层变为条棒状, 晶界 α 相发生再结晶形成球状 α 相, 其 $R_m \geq 995 \text{ MPa}$, $R_{p0.2} \geq 931 \text{ MPa}$, $A \geq 15\%$, 综合性能优异。

参考文献 References

[1] 孙花梅, 刘伟, 戚运莲, 等. Ti-B25 钛合金管材挤压成形数值模拟及实验研究[J]. 钛工业进展, 2021, 38(1): 25-29.

[2] 安仲生, 陈岩, 赵巍. 2021 年中国钛工业发展报告[J]. 钛工业进展, 2022, 39(4): 34-43.

[3] 张望成, 鲁蓉蓉, 曾宪山. 核电热交换器用耐蚀钛焊管制备工艺研究[J]. 钛工业进展, 2021, 38(4): 34-37.

[4] 周佳宇, 哈军. 钛合金材料在舰船管系上的应用[J]. 材料开发与应用, 2006(6): 40-42.

[5] 张旺峰, 张晖, 颜孟奇, 等. 飞机液压系统用 TA18 钛合金管材性能特殊性研究[J]. 钛工业进展, 2018, 35(4): 22-25.

[6] 余志远. 钛合金无缝管材的研制与应用现状[J]. 热加工工艺, 2018, 47(9): 6-10;

[7] 李宝霞, 李红博, 赵富强, 等. 大规格 TC4 无缝管材工艺研究[J]. 有色金属加工, 2018, 47(5): 47-49;

[8] 庞继明, 肖雅静, 曲恒磊, 等. 不同方法制备的钛及钛合金管坯组织与性能研究[J]. 钛工业进展, 2010, 27(4): 34-36.

[9] 肖雅静, 徐先泽, 张数启, 等. 斜轧穿孔法制备 TC4 合金管坯[J]. 稀有金属快报, 2008, 27(1): 29-32.

[10] 李元德, 朱燕玉, 贾立虹, 等. 连轧管机组发展历程及生产技术[J]. 钢管, 2010, 39(2): 1-13.

[11] 殷国茂. 我国无缝钢管生产和装备的发展历程及今后的发展思考[J]. 钢管, 2011, 40(6): 10-19.

[12] 中国有色金属总公司. 航天高压气瓶用 TC4 钛合金管材规范: GJB 2914—1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.

行业动态

西安交通大学在低成本高强韧钛合金设计方面取得新进展

高比强度钛合金是实现节能减排以及轻量化的重要结构材料, 可通过调节晶界 (GBs) 和异相界面 (PBs) 的密度和空间分布特征优化其宏观力学性能。对于钛合金, 除了扩散相变 ($\beta \rightarrow \alpha$) 外, 还可以通过快速冷却条件下的无扩散位移转变 ($\beta \rightarrow \alpha'$) 引入高密度 PBs。但由于钛合金中尺寸为几十甚至几百微米的较大 β 晶粒往往会形成微米级和亚微米级的马氏体片层, 导致相界面密度低而屈服强度不高。因此, 利用晶界工程 (GBE) 构建具有精细微观组织的高强韧钛合金仍然存在挑战。为此, 西安交通大学金属材料强度国家重点实验室孙军院士团队提出了采用化学界面工程 (CBE) 制备纳米马氏体的新策略。基于高温下合金元素之间显著的扩散失配可以构筑高密度化学界面 (CBs, 定义为在晶格连续区域内至少一个元素存在浓度梯度的不连续) 的设计思想, 考虑到不同合金元素在 BCC-Ti 和 HCP-Ti 基体中扩散速率的差异, 选用低成本快扩散元素 Cr 和慢扩散元素 Al, 以 $\text{Ti-xCr-4.5Zr-5.2Al}$ ($x = 1.8, 2.3, 2.8 \text{ wt}\%$) 合金为模型材料, 通过快扩散元素 Cr 调控化学界面的密度。高温状态下 Cr、Al 元素的扩散失配形成高密度 CBs, 这些 CBs 可以将每个 β 晶粒分割成大量贫 Cr 和富 Al 纳米域。在随后水冷过程中, 马氏体更容易在这些富 Al 或贫 Cr 纳米域中形核, 即这些富含 Al 或贫 Cr 的纳米域作为纳米马氏体形核位点, 而化学界面则作为马氏体长大的壁垒, 限制其快速生长。基于 CBE 理念, 团队在 $\text{Ti-2.8Cr-4.5Zr-5.2Al}$ 合金中成功创造了迄今为止最小尺寸的纳米马氏体 (平均尺寸为 $20 \pm 6 \text{ nm}$), 且与当前已报道的其他马氏体钛合金相比, 该钛合金成本最低, 具有比强度最高且强塑性匹配优异等特点。团队提出的 CBE 设计策略突破了钛合金原有微观组织/合金成分设计理念和热机械加工方法的局限, 为设计高性能先进钛合金和其他具有类似特性的金属结构材料提供了新的思路。

该研究成果以《层级纳米马氏体构造的低成本超高强塑钛合金》(Hierarchical nano-martensite-engineered a low-cost ultra-strong and ductile titanium alloy) 为题发表于《自然-通讯》。

来源: 西安交通大学官网