

TA18 钛合金热处理和轧制过程中组织及性能演变规律

李渤渤^{1,2} 王 哲² 樊江昆¹ 王 非² 陶会发² 柳 培³ 汪海涛^{4,5} 李金山¹

(1. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 西安 710072; 2. 洛阳双瑞精铸钛业有限公司, 洛阳 471000; 3. 河南科技大学材料科学与工程学院, 洛阳 471023; 4. 中国科学技术大学材料科学与工程学院, 沈阳 110016; 5. 中国石油集团宝石管业有限公司, 宝鸡 721008)

摘 要 对热轧态 TA18 板材进行不完全再结晶退火处理, 获取了具备软硬相特征的不均匀组织。通过室温轧制制备出兼具高强度与高塑性的层状 TA18 合金, 并对其微观组织及力学性能进行研究。结果表明, 经过 700 °C×3 h 退火+冷轧处理后, 厚度为 2.4 mm 的试样具有良好的性能, 其抗拉强度高达 891 MPa, 伸长率可达 15.6%, 说明层状结构组织不仅有效保留了再结晶组织所特有的优异塑性, 同时使材料具有优良的强塑性。

关键词 高强高塑; 冷加工工艺; 微观组织; 力学性能

中图分类号 TG146.23; TG156; TG113.25

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240424

Evolution of Microstructure and Mechanical Properties of TA18 Titanium Alloy during Heat Treatment and Rolling Process

LI Bobo^{1,2}, WANG Zhe², FAN Jiangkun¹, WANG Fei², TAO Huifa², LIU Pei³, WANG Haitao^{4,5}, LI Jinshan¹

(1. The State Laboratory of Solidification Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072; 2. Luoyang Shuangrui Precision Casting Titanium Industry Co., Ltd., Luoyang 471000; 3. The College of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023; 4. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Shenyang 110016; 5. CNPC Baoji Petroleum Pipe Industry Co., Ltd., Baoji 721008)

Abstract: Incomplete recrystallization annealing treatment was carried out on hot-rolled TA18 sheet, and inhomogeneous microstructure with the characteristics of soft and hard phases was successfully obtained. Subsequently, lamellar TA18 titanium alloy with high strength and plasticity was fabricated through cold-rolling at room temperature, and the microstructure and mechanical properties of alloy were explored. The results indicate that the specimen with a thickness of 2.4 mm exhibits desirable performance after 700 °C×3 h annealing + cold rolling treatment, where the tensile strength is 891 MPa and elongation reaches up to 15.6%. Therefore, the lamellar structure effectively retains the excellent plasticity specific to the recrystallized microstructure, leading to excellent strength and plasticity.

Key Words: High Strength and Plasticity, Cold Processing Technology, Microstructure, Mechanical Properties

在现代材料科学领域, 钛合金因其优异的性能组合而备受关注。TA18 钛合金是由美国开发的近 α 型钛合金, 由于其良好的室温和高温强度、优异的冷加工性、耐腐蚀性而被作为航空航天管路系统的首选材料^[1]。其相较于纯钛具有较高的强度, 同时相对于高强度钛合金又展现出更优的加工便利性, 这使其成为制造各类复杂结构部件的理想材料^[2-3]。通过热处理和轧制工艺可有效调控 TA18 钛合金板材的性能, 目前关于其在不同热处理条件与轧制工艺参数组合下的性能研究仍相对不足^[4]。这在一定程度上限制了对该合金板

材性能的进一步改善与优化, 常规 TA18 钛合金也难以满足日益增长的高性能材料需求^[5]。因此, 深入研究 TA18 钛合金板材的热处理和轧制工艺对提高 TA18 钛合金力学性能的研究极为重要。

金属材料的强度和塑性之间的平衡关系是一个传统的问题, 常见的 TA18 强化手段是通过冷加工变形使晶粒细化从而获得拥有高强度的超细晶和纳米晶结构^[6-7]。然而, 超细晶和纳米晶不能有效地存储位错, 从而导致应变强化能力不足, 通过这种方法强化的合金往往塑性较低。近年来, 随着金属微观组织调控相关

收稿日期: 2024-10-21; 修订日期: 2024-11-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52074231, 52274396); 洛阳市重大科技专项资助项目(2301002A)

第一作者简介: 李渤渤, 男, 1987 年出生, 博士研究生, E-mail: libobo0816@126.com

引用格式: 李渤渤, 王哲, 樊江昆, 等. TA18 钛合金热处理和轧制过程中组织及性能演变规律[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(10): 1557-1561.

LI B B, WANG Z, FAN J K, et al. Evolution of microstructure and mechanical properties of TA18 titanium alloy during heat treatment and rolling process[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(10): 1557-1561.

研究深入和冷加工方式的发展,通过特殊加工方式调控微观组织来实现强塑性良好匹配的方法大量涌现。其中,层状异构作为热门研究方向,由于其在成本和环保方面的巨大优势而备受关注。层状异构金属材料通过微观层面上不均匀分布的具有巨大性能差异的软硬相组织,使材料在受力变形时产生独特的背应力强化机制,最终实现材料强度和塑性的协同提高^[8-10]。基于TA18钛合金独特的室温晶体构造,通过构建层状组织来实现其强度和塑性的协同提高是当前TA18钛合金性能突破的新方向。武晓雷等^[11]采用异步轧制和不完全再结晶退火工艺制备具有层状异构组织的工业纯Ti。LUO X等^[12]通过机械加工和热处理工艺制备了具有层状异构的AZ31镁合金,并实现了优异的强塑性匹配。在制备层状异构组织的单金属时原始的粗晶材料必须在经过大应变量的变形处理后仍能保持层状特征结构^[13-14],方便后续退火过程中更容易形成层状结构,因此一般选用轧制作为其冷变形工序。另外,为保证出现不均匀结构,后续的退火过程需要采用不完全再结晶退火工艺。适当的退火温度和时间十分重要,过高的温度或过长的时间都会导致新生成的再结晶晶粒数量过多,从而使层状结构特征消失^[15]。轧制+不完全再结晶退火工艺都是工业上常用的处理手段,可进行大规模工业生产。

本研究采用特种轧制和热处理工艺调控制备具有层状异构组织的TA18钛合金,分析制备工艺对TA18钛合金微观组织及性能的影响,研究层状异构TA18钛合金的变形行为和强韧化机制,旨在为高强韧性钛合金的制备提供参考。

1 试验材料及方法

试验原材料为TA18钛合金铸锭(名义成分为Ti-3Al-2.5V),其化学成分见表1。层状异构组织的TA18钛合金制备方法为:TA18铸锭在 β 单相区(温度约为980℃)进行热轧开坯,采用BF-YP15P-2小型双辊轧机进行多道次轧制,形成厚度为5.8 mm的板材,在CDX-1马弗炉中进行700℃×3 h的热处理,最后在室温下进行不同压下量的轧制处理,压下量分别为17%(厚4.8 mm)、25%(厚4.3 mm)、40%(厚3.3 mm)、60%(厚2.4 mm),经过多道次轧制完成试样的制备。制备流程示意图见图1。

表1 TA18 铸锭的化学成分

Tab.1 Chemical composition of TA18 cast ingot %

w_B							Ti
C	O	N	H	Fe	Al	V	
0.018	0.087	0.004 4	<0.001	0.025	2.92	2.22	余量

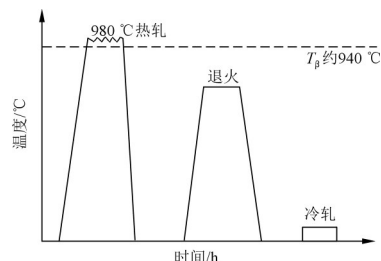


图1 层状异构组织的TA18钛合金制备工艺示意图

Fig.1 Schematic diagram of preparation process of TA18 titanium alloy with lamellar heterogeneous structure

采用线切割切取尺寸为45 mm×4 mm×2 mm的狗骨形拉伸试样,标距长度为15 mm,采用WDW-100电子万能试验机进行室温单轴拉伸试验,拉伸速率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。使用岛津CX40M光学显微镜和JEM-ARM200F透射电镜进行微观组织表征。金相试样依次通过400、800、1 000、1 500和2 000号砂纸进行打磨,然后进行电解抛光,最后对试样表面进行腐蚀,电解液采用体积分数为5%高氯酸+95%冰醋酸(体积分数)溶液,腐蚀液采用HF、HNO₃、H₂O体积配比为1:3:7的混合溶液。使用JSM-IT100扫描电镜(SEM)对试样断口形貌进行观察。

2 组织及性能分析

2.1 微观组织表征

图2为原始热轧态TA18合金金相组织。可以看出,原始热轧态合金组织为沿轧制方向大量横向拉长的层状变态晶粒组织,由大变形量轧制形成的层状分布的细小 α 相和极少量 β 相组成。对热轧后的试样进行700℃×3 h的退火处理,退火后轧制到厚度为4.8 mm(17%压下量)合金的微观组织中仍存在大量再结晶组织,具有明显层状结构,晶粒未明显伸长,仍以大量 α 相和少量 β 相组成,相较于轧制态未发生明显变化。4.3 mm厚板材(25%压下量)的微观组织出现了部分变态 α 晶粒,此时孪晶已经开始出现,部分再结晶晶粒也有了沿轧制方向伸长的特征,可观察到异构组织典型的软硬相分布,但由于软相占比过大,层状分布不明显。3.3 mm厚板材(40%压下量)的微观组织中可观察到硬相逐渐包围软相组织,同时一部分软相组织也已经破碎,出现了明显的沿轧制方向伸长的特征,层状结构开始出现。2.4 mm厚板材(60%压下量)的微观组织中出现大量破碎细小的 α 相,部分拉长的软相再结晶组织不规则分布其中并被完全包围,两种组织都沿轧制方向明显伸长,表现为交错分布的条状组织,软硬相的分界明显,而且整体呈明显的层状分布。

图3为TA18钛合金在60%轧制变形量的TEM组

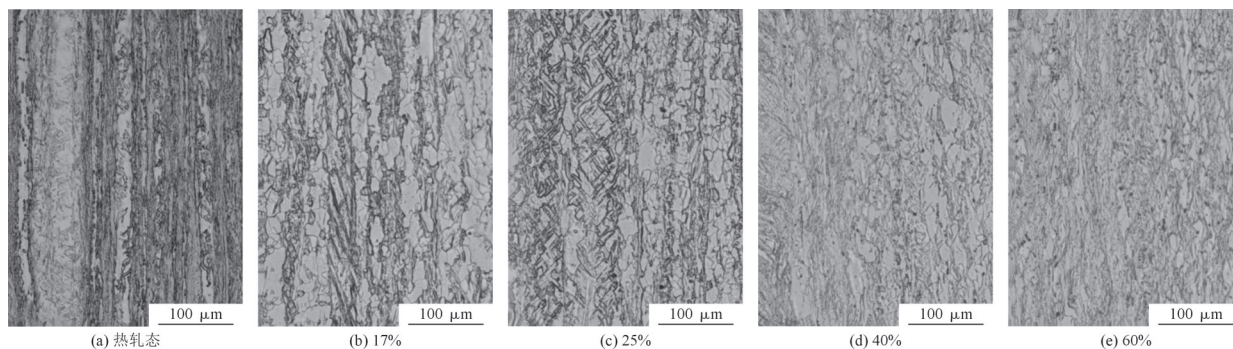


图2 热轧态和不同变形量的TA18钛合金组织形貌

Fig.2 Morphologies of hot-rolled TA18 titanium alloy at different deformation rate

织。可以看出,与热轧态TA18钛合金相比,60%的冷轧量引入了大量超细晶组织,其与粗晶相互缠结,见图3a。此外,图3b中出现明显的层状组织结构,由粗晶层和细晶层组合而成。其中,因轧制变形量较大,组织中的晶粒沿轧制方向均被拉长。双相结构属于典型的异构组织结构形式,在其组织构成里通常包含一个硬相以及一个软相。一般而言,硬相和软相具备不同的晶体结构类型。在这种结构中,软相与硬相之间能够凭借协调作用达成优势互补,以实现材料力学性能及其他各项性能的提高^[16-17]。本研究中,针对金属材料首先实施退火处理操作,由此获取在硬相基体中呈层状分布的软相再结晶组织,接着开展大变形处理工艺,进而形成硬相板材,通过对组织的精准调控,最终成功制备出层状异构单金属材料。

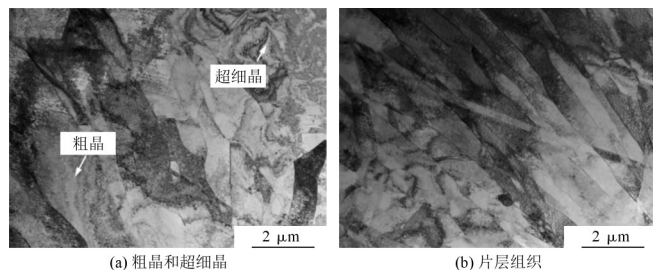


图3 TA18钛合金60%轧制变形量的TEM表征

Fig.3 TEM characterization of TA18 titanium alloy with 60% rolling deformation amounts

2.2 力学性能测试

图4为不同轧制变形量的板材沿轧制方向的应力-应变曲线。可以看出,TA18原始热轧态组织抗拉强度为639 MPa,屈服强度为529 MPa,伸长率为16%。对比可知,轧制后TA18钛合金板材性能均明显优于原始组织,其中17%变形量下抗拉强度为641 MPa,伸长率为20%,较其他试样具有较大差异。这是由于变形量太低导致室温轧制的细晶效果十分有限,组织中仍存在大量再结晶组织,性能表现为塑韧性大幅提高但强度提高并不明显。经过25%、43%和60%变形量后,随着部分晶粒细化,层状组织特征开始凸显,强度提

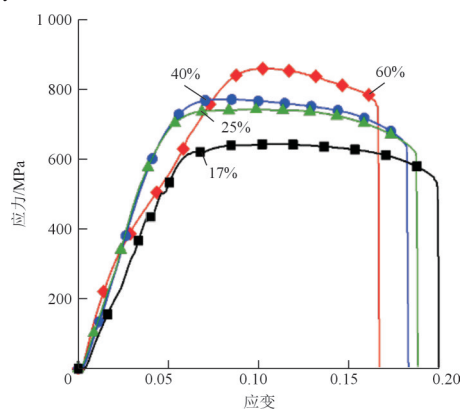


图4 不同变形量下TA18钛合金拉伸应力-应变曲线

Fig.4 Tensile stress-strain curves of TA18 titanium alloys with different deformation rate

高,60%变形量的试样抗拉强度为860 MPa,伸长率为16.6%。退火形成的软相再结晶组织和后续轧制产生的硬相轧制变形组织形成的不均匀组织发挥其改善性能的作用。其强韧化机制包含细晶位错、孪生强化。在细晶和位错强化方面,当材料组织细化时,晶界密度会显著提高。晶界在材料的微观结构中扮演着重要角色,由于其原子排列的不规则性以及晶粒内部原子排列的差异,对于位错的运动产生了强烈的阻碍作用。在塑性变形过程中,位错是晶体滑移的主要载体,当位错在滑移面上移动并接近晶界时,晶界的特殊结构使其无法顺利穿越,从而导致位错在晶界前堆积形成位错塞积^[18]。随着位错塞积的不断增加,后续位错想要继续滑移就需要克服更大的阻力,这就要求施加更高的外力,从而提高了材料的屈服强度。这种由晶界密度增加所引发的对位错滑移的阻碍机制,有效地增强了材料的强度,并且在一定程度上也改善了材料的韧性,因为细晶结构可以使应力在多个晶粒间更为均匀地分布,减少应力集中现象的发生,进而提升材料整体的强韧性表现^[19-20]。由于晶体内部晶粒大小的差异性,在软硬界面的交界处会出现额外的异构变形诱导强化效应。由于硬相具有更高的屈服强度,当材料被拉伸至软相屈服点时,软相会因为继续增加的加载力而发生

屈服形变,此时在软硬相的交界处会由于背应力而出现几何必须位错的堆积,从而阻碍新位错的移动,造成软相组织的屈服强度的升高,而硬相组织中则会出现与背应力相对应的前应力,这种应力会减小硬相中位错开动的阻力,从而减小硬相的屈服强度^[21]。最终,总体材料在背应力和前应力的共同作用下实现了强度和塑韧性的协同提高。

结果表明,层状异构组织既保持了再结晶组织优异的塑性,同时保留了变形后形成的微米级细晶的强度。同时,随着室温轧制变形量的增加,其抗拉强度和屈服强度逐渐增加,而伸长率仅略微降低。这是由于随着轧制变形量的增加,晶粒逐渐破碎和拉长,组织中硬相与软相的比例不断改变,异构变形诱导强化效应逐渐增强,同时组织的层状结构特征逐渐明显,细晶强化作用也不断增强,导致在受到加载力后,晶体内部产生了高强度的位错,阻碍其进一步变形而使强度逐渐升高。同时,由于软相再结晶组织呈不均匀的层状分布,在断裂时很好地保持了其塑韧性,最终得到在几乎不损失塑韧性的前提下强度大幅提高,实现了良好的强塑性匹配。

2.3 断口形貌分析

图5为不同厚度拉伸试样断口宏观形貌。可以看

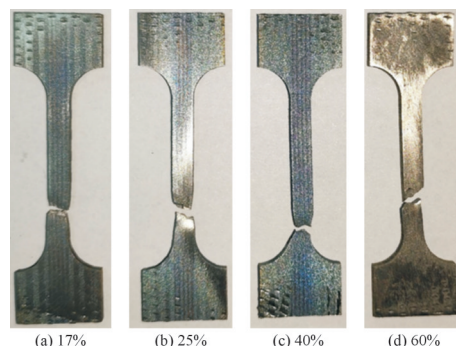


图5 不同变形量下TA18钛合金拉伸断口的宏观形貌

Fig.5 Macro morphologies of tensile fracture of TA18 titanium alloy with different deformation rate

出,试样断口表面均不平整,在断裂前试样都出现了颈缩现象。TA18钛合金试样断口微观形貌见图6。可以看出,断面存在很多韧窝及人字形山脊状花纹,结合宏观形貌可判断其断裂形式为韧性断裂,其断裂失效机理为微孔聚合,即合金内部的第二相质点或夹杂物在加载力的作用下形成微孔并随着力的增大逐渐长大连结,后沿拉伸方向延长并形成空洞,空洞连接最终导致金属断裂,说明经处理后的材料具有优良的塑韧性。

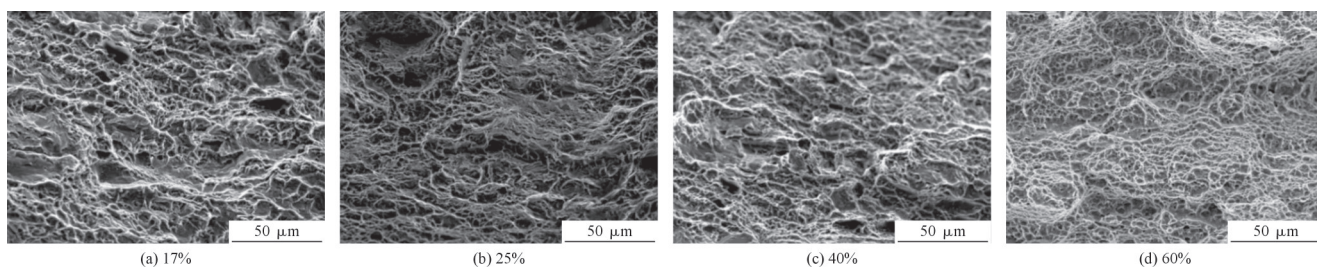


图6 不同变量形下TA18钛合金拉伸断口的微观形貌

Fig.6 Micro morphologies of tensile fracture of TA18 titanium alloys with deformation rate

3 结 论

(1)TA18合金经不同变形量轧制后,随着部分再结晶晶粒的破碎和孪晶的形成,晶粒会逐渐细化,变为组织中的硬相,同时组织中一些再结晶时长大充分的晶粒会保留下来,作为软相不均匀分布其中。同时这些再结晶组织和微米级细小晶粒会由于轧制力而出现在轧制方向上的伸长,总体组织会逐渐呈现层状分布。

(2)随着轧制变形量增加,轧制的细化作用会越来越明显,同时硬相的比例和总体组织的层状特征也会逐渐增大。

(3)不同轧制变形量的TA18钛合金室温断口形貌断口处均存在大量韧窝,软硬相界面在拉伸过程中的位错塞积很好地强化了材料加工硬化的能力,使材料具有良好的伸长率。

(4)经700℃×3h退火,60%变形量的试样综合力学性能最好,轧制后抗拉强度为860MPa,伸长率为16.6%,表现出优秀的强度和塑韧性,满足TA18钛合金材料高强塑的需求。

参 考 文 献

- [1] 杜立成,杨浩雪,吴韵桀,等.近 α 钛合金静动态力学行为研究进展[J].铸造技术,2025,46(1):1-17.
- [2] 刘奇先,刘杨,高凯.钛合金的研究进展与应用[J].航天制造技术,2011(4):45-48,55.
- [3] 陈军,王廷询,周伟,等.国内外船用钛合金及其应用[J].钛工业进展,2015,32(6):8-12.
- [4] 张欢,周娜,郑鹏飞,等.热处理工艺对TA24钛合金棒材显微组织及性能的影响[J].锻造与冲压,2023(21):49-51.
- [5] 彭力,江健,罗小峰,等.TA18钛合金热变形行为及热加工图研究[J].钢铁钎钛,2022,43(6):45-50.
- [6] 刘正乔,江彪.TA18钛合金热轧卷热处理工艺研究[J].钛工业进展,2019,36(3):35-37.