

TC4 钛合金型材高温拉伸变形组织

范勇斌¹ 余 堃¹ 肖 寒² 黄海广^{1,2} 曾文文² 刘 昆¹ 周荣锋²
(1.云南钛业股份有限公司; 2.昆明理工大学材料科学与工程学院)

摘 要 对热轧退火态 TC4 钛合金型材进行了不同变形条件下的高温拉伸试验,采用金相显微镜进行微观组织观察,研究了变形温度、拉伸速率对 TC4 钛合金组织演变的影响。结果表明,当拉伸速率不变时,随着变形温度升高,组织中的片状 α 相最先开始向等轴 α 相转变。随着温度的进一步升高,晶界被打碎,晶界 α 相也开始发生等轴化,组织由魏氏组织转化为等轴组织;当变形温度恒定时,拉伸速率越低,组织中片状 α 相和晶界 α 相的细化程度和等轴化程度越高,并且由魏氏组织向等轴组织转变。

关键词 TC4 钛合金;高温拉伸;微观组织;等轴 α 相

中图分类号 TG146.23 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.01.016 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Tensile Deformation Microstructure of TC4 Titanium Alloy Profile at High Temperature

Fan Yongbin¹, Yu Kun¹, Xiao Han², Huang Haiguang^{1,2}, Zeng Wenwen², Liu Kun¹, Zhou Rongfeng²
(1.Yunnan Titanium Industry Co., Ltd.;
2.Faculty of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology)

Abstract: High temperature tensile tests of hot-rolled annealing TC4 titanium alloy profile were carried out at 773 K, 993 K and 1 093 K, respectively with 1 mm/min, 0.618 mm/min, 0.382 mm/min and 0.236 mm/min. The microstructure of TC4 titanium alloy was observed by metallographic microscope, and the effects of different deformation temperature and strain rate on the microstructure evolution of TC4 titanium alloy were investigated. The results indicate that when the stretching rate is constant, the lamellar α phase in the microstructure is firstly converted into the equiaxed α phase with the increase of deformation temperature. With the further increase of temperature, the grain boundary is broken, of which the α phase also began to undergo equiaxed transformation, and the microstructure is converted from weissmann microstructure to equiaxed microstructure. When the deformation temperature is constant, with decreasing in the stretching rate, the fineness and equiaxed degree of the laminar and grain boundary α phases in the microstructure are increased, and the weissmann structure is converted to the equiaxed structure.

Key Words: TC4 Titanium Alloy, High Temperature Tensile, Microstructure, Equiaxed α Phase

TC4 钛合金作为一种典型的 $\alpha+\beta$ 型两相钛合金,在比强度、强韧性、耐热性、抗疲劳、耐腐蚀、可焊接等综合性能方面表现优异,因此在航空航天、兵器、船舶、石油化工、医疗等领域得到了广泛应用^[1~5]。TC4 钛合金是应用规模最多的钛合金之一,也得到了大量研究^[6~8]。

TC4 钛合金在高温拉伸变形时,其微观组织会发生明显变化,从而影响材料的综合性能。因此,国内外众多研究者针对钛合金的高温拉伸时微观组织的演变

规律开展了大量研究。蔡云^[9]分析了 TC4 钛合金高温时变形温度、变形量、变形速率对组织的影响,发现随变形温度升高,组织结构发生变化, α 相体积分数减小,晶粒尺寸长大。应变速率较慢时晶粒长大严重,随应变速率增加,变形过程中动态再结晶加剧,晶粒出现细化,变形区晶粒长大不明显。随变形量增加,再结晶、晶粒粗化明显。冯亮等^[10]通过计算对 TC21 钛合金高温变形行为进行了研究,结果表明,钛合金在 1 173~1 373 K 时存在不同的变形激活能,即钛合金在不同温度下的变

收稿日期:2020-07-20;修改稿收到日期:2020-08-10
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0301202);云南省重大科技专项计划资助项目(202002AB080001);云南省技术创新人才计划资助项目(2017HB104)
第一作者简介:范勇斌,男,1963 年出生,工程师,云南楚雄(651209),E-mail:44275863@qq.com
通信作者:黄海广,男,1985 年出生,高级工程师,云南楚雄(651209),E-mail:37178306@qq.com
引用格式:范勇斌,余堃,肖寒,等. TC4 钛合金型材高温拉伸变形组织[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(1):78-82.
FAN Y B, YU K, XIAO H, et al. Tensile deformation microstructure of TC4 titanium alloy profile at high temperature[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(1):78-82.

形机制不同。 β 区变形是以高温扩散为主的动态回复机制,动态回复、动态再结晶以及晶界迁移引起了钛合金流变应力的软化;两相区变形机制一般认为是晶界滑移。曾卫东等^[11]用热模拟压缩试验研究了 Ti-17 合金高温变形特点,通过金相组织和 TEM 观察分析发现, β 区变形是扩散回复型变形机制占主导地位,在高应变速率下只发生动态回复,其流变应力软化是变形热的作用,低应变速率下发生的连续再结晶是由高温回复亚晶直接形核;在 $(\alpha + \beta)$ 两相区的变形机制以界面滑移为主,在高应变速率下易发生动态再结晶,其流变应力软化归因于变形热、动态回复和动态再结晶。刘昆等^[12]通过单向拉伸试验研究了热轧退火态 TC4 钛合金型材的高温变形行为,分析了变形温度和应变速率对 TC4 钛合金力学性能的影响。随着变形温度升高或者拉伸速率降低,断口中韧窝数量越来越多,且韧窝的形状逐渐趋于规则,试样的断裂方式由脆性断裂和韧性断裂的混合型断裂转变为韧窝聚合型延性断裂,最后转变为韧性断裂。曲银化等^[13]通过等温压缩试验发现,影响 TC4 钛合金流变应力较大的两个主要因素是变形温度和变形速率,TC4 钛合金发生软化的根本原因是在变形过程中发生了动态再结晶。HUANG C 等^[14]研究了 Ti-24Al-14Nb-3V-0.5Mo 合金热压缩变形特征,结果表明,该合金在 $(\alpha + \beta)$ 两相区热压缩时的变形机制是动态回复和晶界滑移的共同作用。材料在进行热变形时,显微组织的演变规律反映了其加工硬化和软化过程之间的相互作用关系,而热变形过程中变形温度和应变速率的变化又会影响材料加工硬化和软化的过程,所以研究在不同变形工艺参数下合金的显微组织的演变十分必要。

本课题将热轧退火态 TC4 钛合金型材进行高温单向拉伸试验,研究了在不同变形温度和拉伸速率下其微观组织的演变规律,以了解 TC4 钛合金型材的高温变形行为。

1 试验材料及方案

试验材料为经过 3 次真空自耗电弧炉 (VAR) 熔炼的 TC4 钛合金铸锭。取 10 g 的 TC4 钛屑采用 OHN-2000 型氧氮氢分析仪进行化学分析, 实际化学成分见表 1。该铸锭实际化学成分符合 GB/T 3620.1-2007 标准要求。

表 1 TC4 钛合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of TC4 titanium alloy							%
ω_B							
Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
5.9	4.3	0.3	0.04	0.02	0.005	0.06	余量

采用 MELER/1600H 热分析仪进行 DSC 测量,升温速率为 10 K/min,测得 TC4 钛合金的 β 转变温度为 1 253.5 K。采用线切割将铸锭加工成截面尺寸为 150 mm $\times$ 150 mm 的方坯,然后进行粗轧、中轧、精轧等热轧工序,轧制成尺寸为 75 mm $\times$ 75 mm $\times$ 8 mm 的等边 L 型型材。采用型号为 QSH-1400 箱式电阻炉对其进行 993 K 保温 80 min 的退火处理。采用线切割机从退火型材上切取高温拉伸试样,见图 1,并打磨光滑,保证无明显划痕,在 WDW-20 微机控制电子万能试验机上进行高温单向拉伸试验,当试样加热到设定温度后保温 10 min,再以恒定拉伸速率进行高温拉伸,直到拉伸结束后才停止保温。高温拉伸试验的温度为 773、993 和 1 093 K,拉伸速率为 1、0.618、0.382 和 0.236 mm/min。使用金相切割机从拉伸试样断口处取样制取金相试样,然后用 SiC 砂纸依次进行粗磨、细磨和精磨,再电解抛光,电解液采用体积比为 1:9 的高氯酸、冰醋酸混合液。随后用体积比为 3:7:10 的氢氟酸、硝酸、水溶液对抛光后的试样表面进行腐蚀,待试样表面微变色后,立即用清水进行冲洗,以免腐蚀过度,再用酒精冲洗,然后快速吹干,防止试样氧化或污染。最后用 Nikon E-CLIPSE MA200 金相显微镜对金相试样进行观察,研究在不同变形温度、不同应变速率下 TC4 钛合金的组织演变。

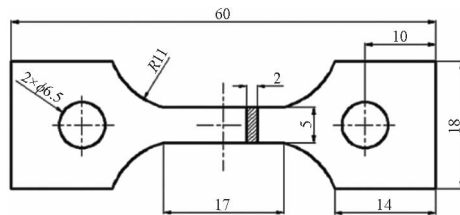


图 1 高温拉伸试样尺寸

Fig.1 Dimension of high-temperature tensile specimen

2 试验结果与讨论

2.1 变形温度对退火态 TC4 钛合金高温拉伸组织影响

退火态 TC4 钛合金热轧型材的金相组织见图 2。

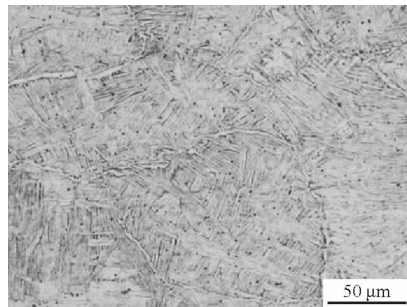


图 2 TC4 钛合金退火态热轧型材原始组织

Fig.2 The original microstructure of annealed hot-rolled TC4 profile

图 2 可知,合金退火后的组织为魏氏组织, β 晶粒较大,且 β 晶界上分布着清晰的 α 相, β 晶界内存在大量片状的 α 相集束,且 β 相将片状 α 相隔开。

图 3~图 6 分别是热轧退火态 TC4 钛合金在拉伸速率为 1、0.618、0.382、0.236 mm/min,不同变形温度下的金相组织。由图 3 可以看出,当变形温度为 773 K

时,与热轧退火态型材原始组织相比,组织变化不明显,只有少量的片状 α 相和晶界 α 相被细化。当变形温度为 993 K 时,相比于 773 K,组织中的片状 α 相和晶界 α 相细化程度有所增加。当变形温度为 1 093 K 时,组织中片状 α 相和晶界 α 相几乎全部被细化和等轴化,只有少量的片状 α 相和晶界 α 相存留。

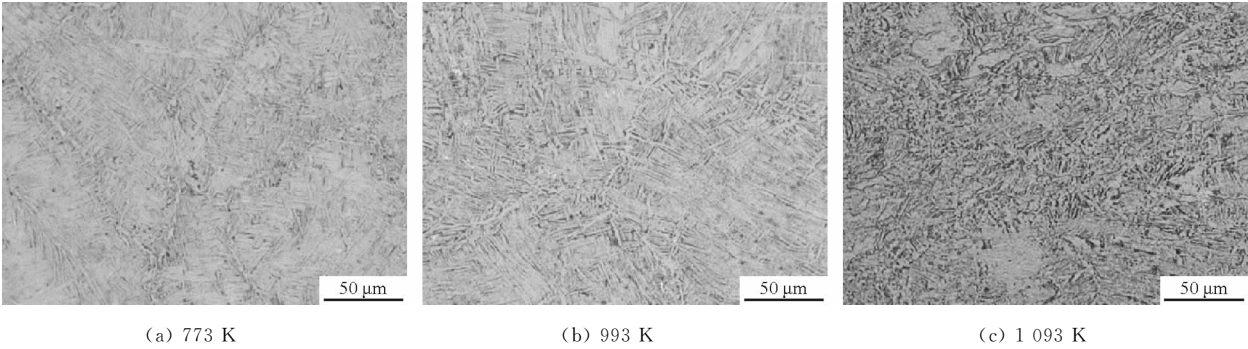


图 3 不同变形温度下拉伸速率为 1 mm/min 的 TC4 合金高温拉伸金相组织

Fig.3 High temperature tensile metallographic structure of TC4 alloy at different deformation temperatures and tensile rate of 1 mm/min

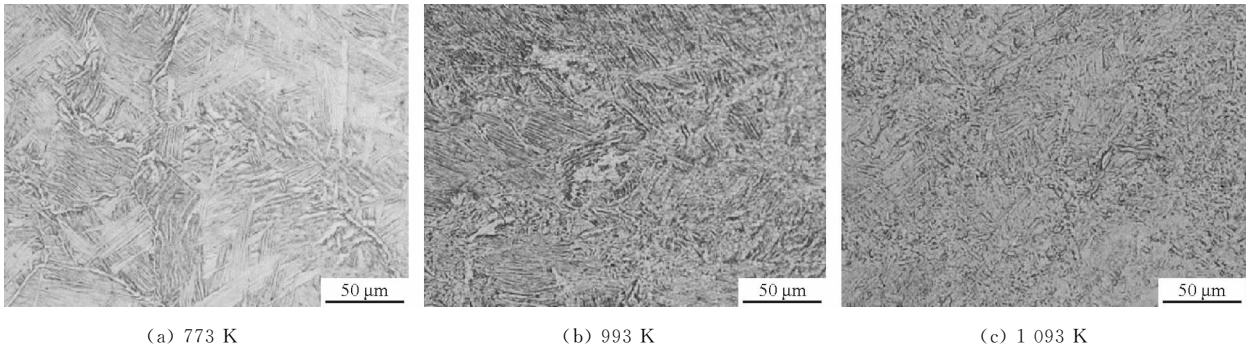


图 4 不同变形温度下拉伸速率为 0.618 mm/min 的 TC4 合金高温拉伸金相组织

Fig.4 High temperature tensile metallographic structure of TC4 alloy at different deformation temperatures and tensile rate of 0.618 mm/min

由图 4 可以看出,当变形温度为 773 K 时,与热轧退火态型材原始组织相比,材料的组织没有明显变化。当变形温度为 993 K 时,组织中的片状 α 相和晶界 α 相在一定程度上细化和等轴化,在晶界 α 相中析出了尺寸较大的等轴 α 相,在 β 晶粒中的片状 α 相中析出了尺寸

较小的等轴 α 相。当变形温度为 1 093 K 时,组织中的片状 α 相和晶界 α 相基本全部被细化和等轴化,细化程度和等轴化程度显著增加^[15]。

由图 5 可以看出,当变形温度为 773 K 时,与热轧退火态型材原始组织相比,组织中只有少量的片状 α 相

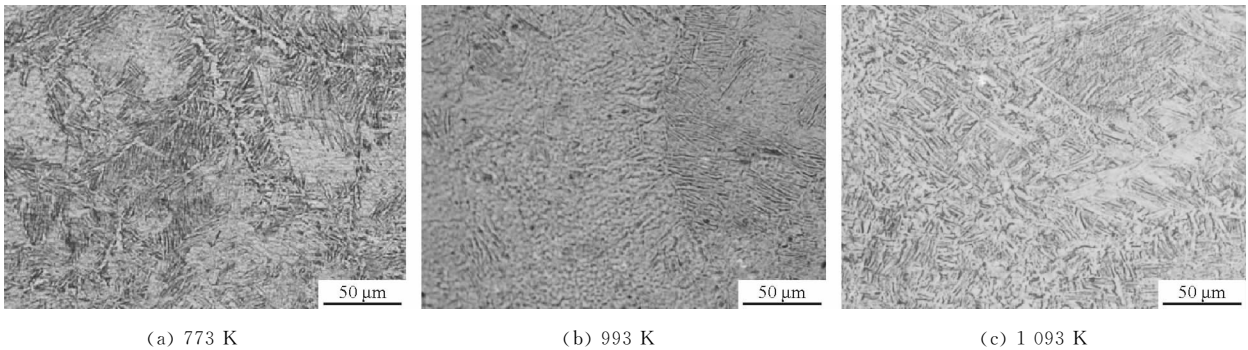


图 5 不同变形温度下拉伸速率为 0.382 mm/min 的 TC4 合金高温拉伸金相组织

Fig.5 High temperature tensile metallographic structure of TC4 alloy at different deformation temperatures and tensile rate of 0.382 mm/min

被细化。当变形温度为 993 K, β 晶粒中有大量的片状 α 相被细化和等轴化。当变形温度为 1 093 K 时, 组织中的片状 α 相和晶界 α 相基本全部被细化, 组织由魏氏组织转化为等轴组织, 原始组织中只有极少的晶界 α 相残留^[16]。

由图 6 可以看出, 当变形温度为 773 K 时, 组织中

的片状 α 相基本全部转化为小颗粒的等轴 α 相, 但晶界 α 相变化不大。当变形温度为 993 K 时, 片状 α 相基本转化为小颗粒的等轴 α 相, 晶界被打碎, 晶界 α 相也有少量发生了等轴化。当变形温度为 1 093 K 时, 片状 α 相和晶界 α 相基本全部转化为等轴 α 相, 组织由魏氏组织转化为等轴组织。

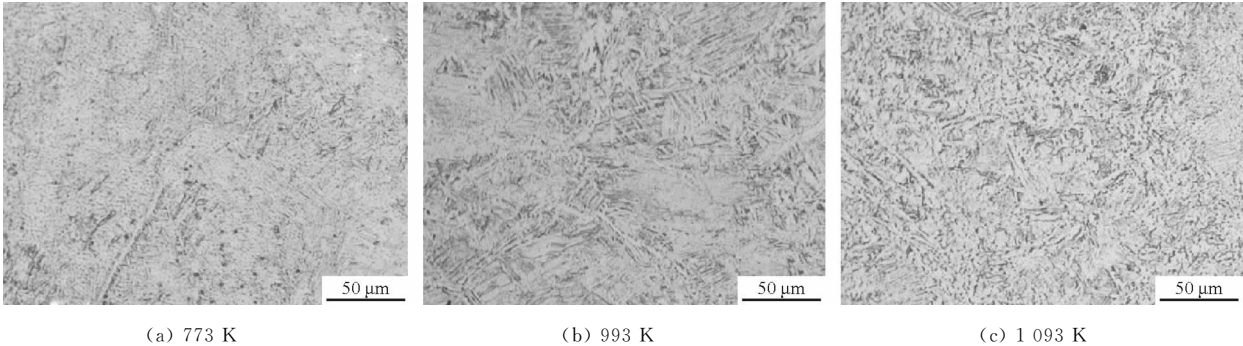


图 6 不同变形温度下拉伸速率为 0.236 mm/min 的 TC4 合金高温拉伸金相组织

Fig.6 High temperature tensile metallographic structure of TC4 alloy at different deformation temperatures and tensile rate of 0.236 mm/min

2.2 变形速率对退火态 TC4 钛合金高温拉伸组织影响

图 7~图 9 分别为退火态 TC4 钛合金型材在变形温度为 773、993、1 093 K 下, 不同拉伸速率时的金相组织。图 7a~图 7c 与图 2 相比, 组织没有发生较大的变化, 说明材料在这 3 种试验条件下组织比较稳定, 该试验条件还不足以产生足够多的畸变能去细化组织。图

7d 与图 7a~图 7c 相比, 组织中 β 晶粒中的片状 α 相基本消失, 片状 α 相和晶界 α 相被细化和等轴化, 只有少量的晶界 α 相存留。这主要是因为该变形条件下, 拉伸时间较长, 使 α 相有充分的时间进行细化和等轴化。这表明该试验条件能产生足够多的畸变能去细化组织中的 α 相。

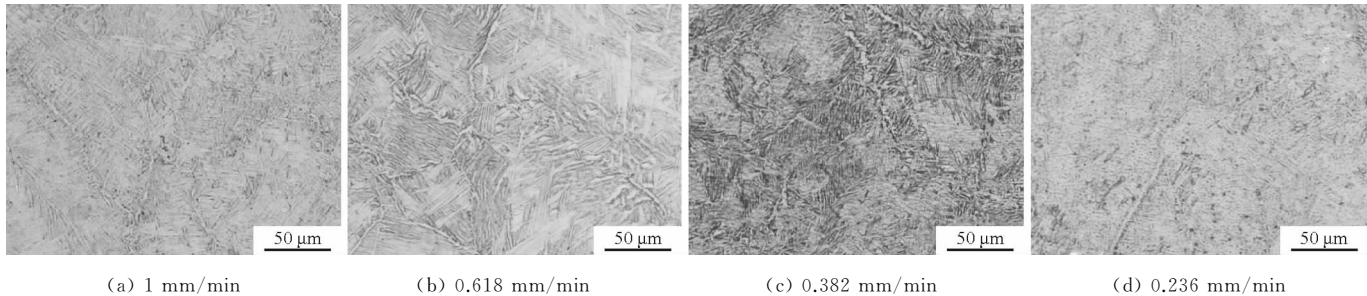


图 7 不同拉伸速率下变形温度为 773 K 的 TC4 合金高温拉伸金相组织

Fig.7 High temperature tensile metallographic structure of TC4 alloy at different tensile rates and temperature of 773 K

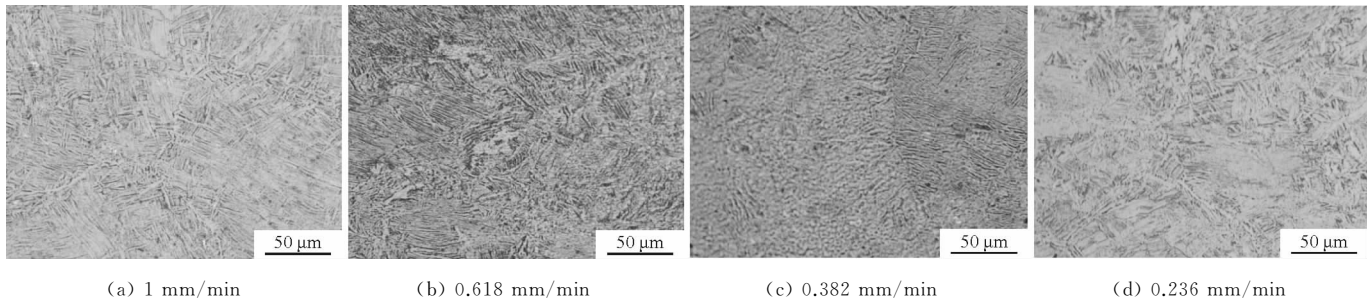


图 8 不同拉伸速率下变形温度为 993 K 的 TC4 合金高温拉伸金相组织

Fig.8 High temperature tensile metallographic structure of TC4 alloy at different tensile rates and temperature of 993 K

由图 8 可以看出, 随着拉伸速率的逐渐降低, 钛合金组织中的片状 α 相逐渐被细化和等轴化, 晶界 α 相也

逐渐被等轴化。组织中 α 相的细化程度和等轴化程度随拉伸速率的降低而逐渐增加。

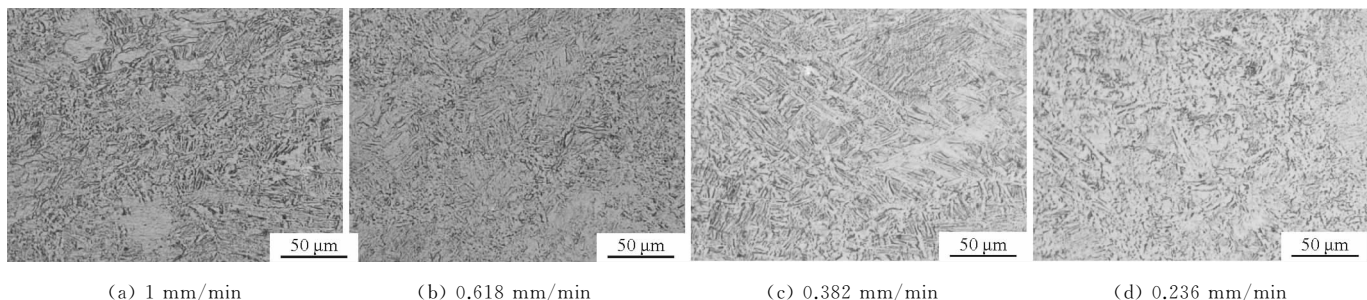


图 9 不同拉伸速率下变形温度为 1 093 K 的 TC4 合金高温拉伸金相组织

Fig.9 High temperature tensile metallographic structure of TC4 alloy at different tensile rates and temperature of 1 093 K

由图 9 可以看出,组织中的片状 α 相和晶界 α 相基本全部被细化和等轴化,且拉伸速率越低,等轴化程度越高。钛合金组织已经由原始的魏氏组织转化为典型的等轴组织。

3 结 论

(1)当拉伸速率不变时,随着变形温度升高,TC4 钛合金组织中的片状 α 相最先开始向等轴 α 相转变,随着温度的进一步升高,晶界被打碎,晶界 α 相也开始发生等轴化,组织由魏氏组织转化为等轴组织。

(2)当变形温度恒定时,拉伸速率越低,TC4 钛合金组织中片状 α 相和晶界 α 相的细化程度和等轴化程度越高,并且由魏氏组织向等轴组织转变。

参 考 文 献

- [1] BANERJEE D, WILLIAMS J C. Perspectives on titanium science and technology[J]. Acta Materialia, 2013, 61(3): 844-879.
- [2] 朱知寿. 我国航空用钛合金技术研究现状及发展[J]. 航空材料学报, 2014, 34(4): 44-50.
- [3] DING H, CAO Z Y, SHI Y M, et al. Heat treatment process of high-speed rolling small size Ti-6Al-4V alloys bar[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(9): 2 396-2 402.
- [4] 赵永庆. 国内外钛合金研究的发展现状及趋势[J]. 中国材料进展, 2010, 29(5): 1-8.
- [5] LUO Y M, LIU J X, LI S K, et al. Effect of hot-rolling temperature on microstructure and dynamic mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(5): 1 333-1 340.
- [6] 刘昆, 黄海广, 秦铁昌, 等. TC4 钛合金高温压缩变形行为与组织演变[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(9): 936-940.
- [7] 王付胜, 王艾伦, 陈亚军, 等. 航空 TC4 钛合金高温力学性能[J]. 热加工工艺, 2017, 46(10): 86-89.
- [8] 金和喜, 魏克湘, 李建明, 等. 航空用钛合金研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(2): 280-292.
- [9] 蔡云. TC4 钛合金高温拉伸力学性能研究和组织演变[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [10] 冯亮, 曲恒磊, 赵永庆, 等. TC21 合金的高温变形行为[J]. 航空材料学报, 2004(4): 11-13.
- [11] 曾卫东, 胡鲜红, 俞汉清, 等. Ti-17 合金高温变形机理研究[J]. 材料工程, 1996(9): 27-30.

- [12] 刘昆, 黄海广, 秦铁昌, 等. 退火态 TC4 钛合金型材高温拉伸行为研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(8): 925-928.
- [13] 曲银化, 孙建科, 孟祥军. TC4 钛合金高温压缩变形行为的研究[J]. 材料开发与应用, 2006(2): 24-29.
- [14] HUANG C, LAI J K L, LEE C S. Deformation characteristics of Ti-24Al-14Nb-3V-0.5Mo alloy during hot compression[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998(1-3): 119-124.
- [15] 安希塘, 卞建春. Ti-6Al-4V 合金两相区 $\alpha \rightarrow \beta$ 等温转变动力学研究[J]. 稀有金属, 1989(1): 31-36.
- [16] RIDLEY N, WANG Z C. The effect of microstructure and deformation conditions on cavitation in superplastic materials[J]. Materials Science Forum, 1997, 233-234: 63-80.

(编辑: 刘晨辉)

新型镁海水燃料电池系统完成试验

近日,由中国科学院大连化学物理研究所(以下简称“大连化物所”)研制的镁海水燃料电池系统顺利完成了 3 000 m 深海试验,实现了新型镁海水燃料电池在深海装备上的首次实际应用。

新型镁海水燃料电池是直接利用海水,将镁的化学能转化为电能,具有能量密度高、安全性好、可全海深工作的特点,在深海着陆器、深海原位实验站等海洋装备领域具有很好的应用前景。

大连化物所方面称,该电池系统在突破了高利用率合金阳极制备技术、长寿命阴极制备技术、全海深浮力调节技术,组合能源管理技术等关键技术的基础上,开展此次深海海试工作。

在此次海上试验中,下潜装置由“鹿岭号”深海多位点着陆器、“海鹿号”漫游者潜水器、新型“镁海水燃料电池及组合能源系统”组成。镁海水燃料电池系统为着陆器和潜水器提供能源,实现多级高效充供电。镁海水燃料电池的最大下潜工作深度为 3 252 m,累计作业时间为 24.5 h,累计为系统供电达到了 3.4 kW · h,充分验证了新型镁海水燃料电池的深海供电能力及长时间放电稳定性。

(摘自中国有色网)