

变形工艺参数对 SP700 钛合金微观组织及显微硬度的影响

邱 仟 王克鲁 李 鑫 王 俊 张开铭 高 鑫

(南昌航空大学航空制造工程学院)

摘 要 采用 Gleeble-3800 型热模拟试验机对 SP700 钛合金进行等温恒应变速率压缩试验,对变形温度为 700~950 °C、应变速率为 0.001~1 s⁻¹ 及最大应变量为 0.9 下 SP700 钛合金的热变形行为进行研究,并分析热变形过程中变形工艺参数对其微观组织演变及显微硬度的影响。结果表明,变形温度和应变速率对合金的峰值流动应力、微观组织演变和显微硬度都有较大的影响。当应变速率不变时,随着变形温度逐渐增大,合金的峰值流动应力降低,其微观组织中 α 相逐渐球化,最终发生动态再结晶,显微硬度也先增大后减小最后又增大。当变形温度不变时,随着应变速率逐渐增大,峰值流动应力增大,微观组织中 α 相球化率降低,且最后呈现出局部流动现象,显微硬度先增大然后减小。

关键词 SP700 钛合金;变形工艺参数;微观组织;显微硬度

中图分类号 TG146.23;TG115.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.04.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Deformation Process Parameters on Microstructure and Microhardness of SP700 Titanium Alloy

Qiu Qian, Wang Kelu, Li Xin, Wang Jun, Zhang Kaiming, Gao Xin

(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University)

Abstract: The Gleeble-3800 thermal simulation testing machine was utilized to conduct isothermal constant strain rate compression experiments on SP700 titanium alloy, and the thermal deformation behavior of the alloy at deformation temperature of 700~950 °C, strain rate of 0.001~1 s⁻¹ and maximum strain of 0.9 was investigated. The influence law of different deformation process parameters during thermal deformation on microstructure evolution and microhardness of the alloy was analyzed. The results indicate that the deformation temperature and strain rate have a great influence on the peak flow stress, microstructure evolution and microhardness of the alloy. When the strain rate is constant, with the gradual increase of the deformation temperature, the peak flow stress of the alloy is decreased, and α phase is gradually spheroidized, which finally undergoes dynamic recrystallization, while the microhardness is increased firstly and then decreased, and finally increased again. When the deformation temperature is constant, with the gradual increase of the strain rate, the peak flow stress is increased, and the spheroidization rate of α phase is decreased, which finally presents a local flow phenomenon, and the microhardness is firstly increased and then decreased.

Key Words: SP700 Titanium Alloy, Deformation Process Parameters, Microstructure, Microhardness

钛及其合金具有密度低、比强度和比刚度高、耐腐蚀性能和低温性能好、抗疲劳和蠕变性能好、无毒、无磁性等优异的性能及特点,被广泛应用于航天航空、舰船制造、生物医疗和石油化工等领域^[1~4]。SP700 钛合金是 20 世纪末在 Ti-6Al-4V 钛合金成分的基础上加入了 β 稳定化元素 Mo 和 Fe 得到的一种富 β 相的($\alpha+\beta$)两相钛合金,与 Ti-6Al-4V 钛合金相比,其具有强度高、塑

性好、优异的疲劳性能和良好冷热加工性等特点^[5~7]。因此,近年来,有关 SP700 钛合金的研究越来越多。党鹏等^[8]通过调整 SP700 钛合金板材的热处理制度,研究了不同热处理工艺下的微观组织形态对 SP700 钛合金板材的力学性能、断裂韧度等性能的影响。王悔改等^[9]对 SP700 钛合金进行了不同的热处理,探究了多重固溶时效热处理对材料微观组织和力学性能的影响。

收稿日期:2021-09-03;**修改稿收到日期:**2021-10-19

基金项目:江西省自然科学基金重点资助项目(20202ACBL204001);江西省研究生创新专项基金资助项目(YC2020-S539)

第一作者简介:邱仟,男,1997 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:1152517738@qq.com

通信作者:王克鲁,男,1968 年出生,教授,南昌(330063),E-mail:wangkelu@126.com

引用格式:邱仟,王克鲁,李鑫,等. 变形工艺参数对 SP700 钛合金微观组织及显微硬度的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(4):459-462.

QIU Q, WANG K L, LI X, et al. Effects of deformation process parameters on microstructure and microhardness of SP700 titanium alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(4):459-462.

GUNAWARMAN B等^[10]则对 SP700 钛合金的力学性能及其在医学领域的应用进行了研究。

有关变形工艺参数对合金热变形行为及微观组织演变的动态响应研究较多。王凌浩等^[11]研究了变形参数对挤压态 AZ41M 镁合金热变形行为和微观组织演变的影响。杨璐等^[12]研究了 7B04 包铝复合板热变形行为及其微观组织演变的影响。刘桐等^[13]研究了 Ti-6Al-2.5V-1.5Fe-0.15O 合金热变形行为及组织演变。PAGHANDEH M 等^[14]研究了 Ti-6Al-4V 钛合金在高温下的压缩/拉伸变形行为及其微观组织演变。

目前,对 SP700 钛合金热变形行为及微观组织演变的研究报道还很少。因此,本课题在热压缩试验的基础上研究不同变形工艺参数对合金热变形行为及微观组织的影响,同时对变形试样进行了硬度测试,旨在为 SP700 钛合金的实际生产提供参考。

1 试验材料与方法

试验材料为 SP700 钛合金,其名义成分为 Ti-4.5Al-3V-2Mo-2Fe(质量分数),相变温度为 900 °C,其原始组织见图 1。可以看出,钛合金组织为典型的网篮状组织,主要由不连续晶界条状 α 相交织在 β 相基体上构成。在 Gleeble-3800 型热模拟机上进行热模拟压缩试验,压缩试样尺寸为 $\phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$,升温速率为 10 °C/s,变形温度分别为 700、750、800、850、900、950 °C。到达指定温度后保温 180 s 以保证试样温度均匀化,同时以不同的应变速率(0.001、0.01、0.1、1 s^{-1})压缩试样到最大真应变为 0.9 时结束。将热压缩后的试样立即水冷以保持住变形态的微观组织结构。之后对变形的试样沿变形轴面剖开成两部分,取剖开面制备金相试样并打磨抛光,采用体积分数为 5% 的 HF+15% 的 HNO_3 +80% 的 H_2O 的腐蚀剂对试样进行腐蚀。采用 MJ41 型光学显微镜观察不同工艺处理后合金的显微组织;采用 HVS-1000 型显微硬度计测试合金的硬度,每个试样测 5 次取平均值。

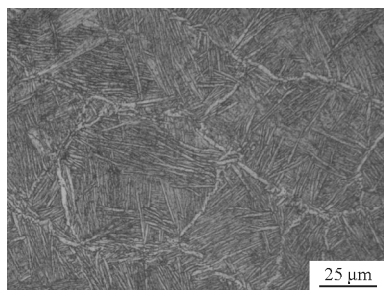


图 1 SP700 钛合金的原始组织

2 试验结果与分析

2.1 变形工艺参数对 SP700 钛合金热变形行为的影响

图 2 为不同变形温度下 SP700 钛合金的流动应力-应变曲线及峰值应力,其中图 2a 的应变速率为 0.01 s^{-1} 。可以看出,SP700 钛合金的真应力和峰值应力都随着变形温度的升高而显著减小。变形温度由 700 °C 升高到 800 °C 时 SP700 钛合金的真应力和峰值应力减小的幅度要比变形温度由 850 °C 升高到 950 °C 时更大。这是由于变形温度升高,内部位错运动进行重排也更迅速,使得合金更易发生动态再结晶;同时变形温度提高,也更容易发生动态回复,在动态软化的作用下,SP700 钛合金的真应力和峰值应力随之减小。且 SP700 钛合金在 700~800 °C 下的峰值应力后的动态软化作用要明显高于 850~950 °C,即变形温度升高,动态软化作用也降低^[15]。

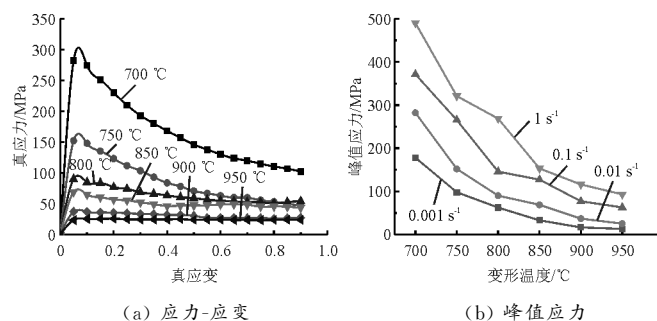


图 2 不同变形温度下 SP700 钛合金的流动应力曲线及峰值应力

Fig.2 Flow stress-strain curve and peak stress of SP700 titanium alloy at different deformation temperatures

图 3 为不同应变速率下 SP700 钛合金的应力-应变曲线及峰值应力,其中,图 3a 的变形温度为 850 °C。可以看出,SP700 钛合金的真应力和峰值应力随应变速率的增大而显著增大。此外,随着应变速率增加,在变形温度为 700~800 °C 的峰值应力增长幅度要大于变形温度为 850~950 °C 的,且高温及高应变速率下的峰值应

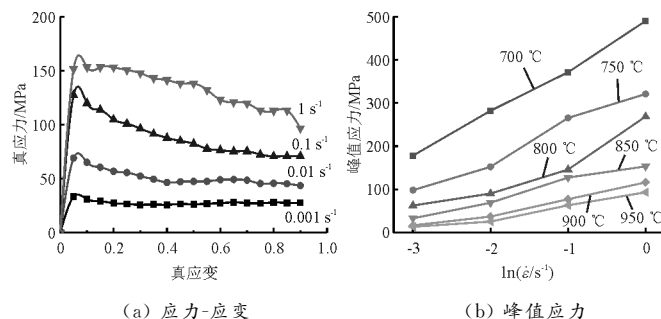


图 3 不同应变速率下 SP700 合金的流动应力曲线及峰值应力

Fig.3 Flow stress-strain curve and peak stress of SP700 titanium alloy at different strain rates

力最小。这是因为随着应变速率增加,合金发生塑性变形所需时间变短,导致发生动态再结晶和动态回复不充分,且合金内部位错迅速增殖,位错密度增大对合金内部造成极大的应力集中^[16]。而变形温度增加,合金的热激活作用增加,使得位错运动和晶面间滑移更易进行,有利于动态软化作用发生,且高温变形可以缓解高应变速率变形引起的加工硬化影响,使得合金峰值应力增大幅度较低。

2.2 变形工艺参数对 SP700 钛合金微观组织演变的影响

图 4 是应变速率为 0.01 s^{-1} 、不同变形温度下 SP700 钛合金的微观组织。可以看出,在相变点温度以下对 SP700 钛合金进行热变形时,热变形产生的压应力使得原始组织中条状 α 相遭到破坏,垂直压缩方向的

条状 α 相被显著拉长,而其他方向上的 α 相出现了扭曲和断裂,总体不再呈现出原始组织中网篮状组织, α 相见图 4a~图 4c 白色箭头处。但随着变形温度逐渐增大, α 相也逐渐发生球化,且 α 相数量减少显著,见图 4d。这是由于接近相变点温度时部分 α 相发生了溶解,使得 α 相稳定性变差,更易于发生球化现象^[17]。而从图 4e 和图 4f 可以看出,当变形温度达到相变温度之后, α 相几乎都转变为 β 相,且 β 相随着变形温度的升高其尺寸减小,即动态再结晶可以细化组织。此外,从图 4f 可以看出,在晶界的位置出现了再结晶晶粒,表明组织发生了动态再结晶。这是因为随着变形温度升高,内部热激活能提高,原子活动和晶界迁移更活跃,促进了动态再结晶的发生。

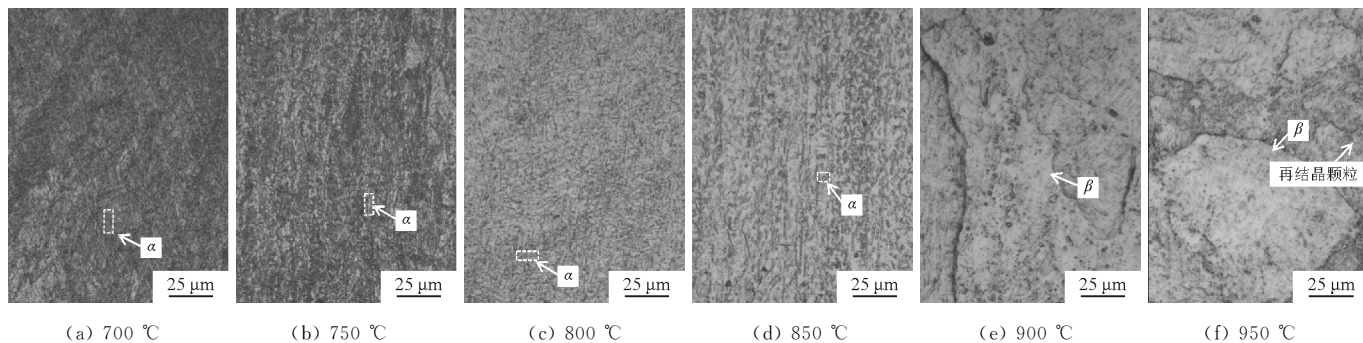


图 4 应变速率为 0.01 s^{-1} 、不同变形温度下 SP700 钛合金的微观组织

Fig.4 Microstructure of SP700 titanium alloy at the constant strain rate of 0.01 s^{-1} and different deformation temperatures

图 5 是变形温度为 850 °C 、不同应变速率下的 SP700 钛合金微观组织。由图 5a 可以看出,在应变速率为 0.001 s^{-1} 时,原始组织条状 α 相发生球化现象。当应变速率为 0.01 s^{-1} 时,原始组织条状 α 相被压长和弯曲,发生球化率明显降低。应变速率为 1 s^{-1} 时,组织

中出现了局部流动现象,见图 5d。随着应变速率增大,组织球化率降低,这与 LIU H J 等^[18]在对 Ti-6Al-4V 合金中的 α 相球化演变研究得到的规律一致。且当变形速率较大时,热变形过程中晶粒没有足够的时间生长,变形后晶粒尺寸随应变速率的增加而减小。

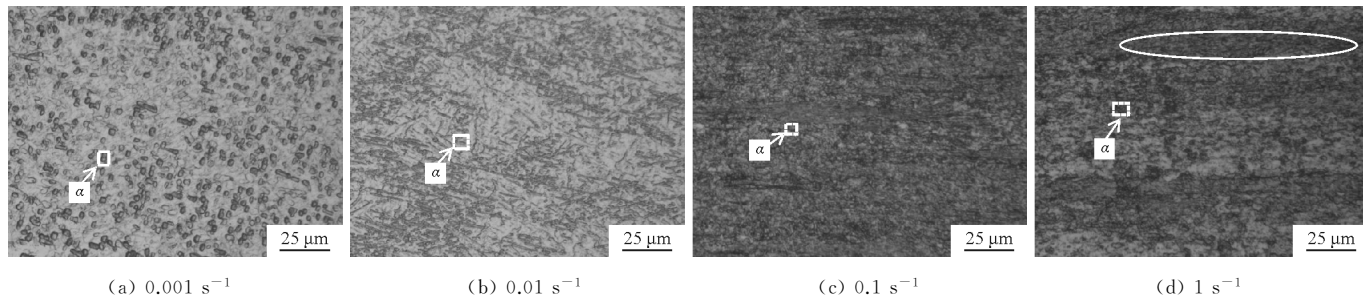


图 5 变形温度为 850 °C 、不同应变速率下 SP700 钛合金的微观组织

Fig.5 Microstructure of SP700 titanium alloy at the constant deformation temperature of 850 °C and different strain rates

2.3 变形工艺参数对 SP700 钛合金显微硬度的影响

图 6 是应变速率为 0.01 s^{-1} 、不同变形温度下 SP700 钛合金的显微硬度。可以看出,当应变速率为 0.01 s^{-1} 时,SP700 钛合金的显微硬度随变形温度的升高首先增大然后减小最后又增大,且在 750 °C 时硬度 (HV) 最大,为 333.7,这与上述显微组织中的 α 相体积分数变化一致。 α 相含量降低或升高会使合金的硬度

下降或上升,这是因为具有密排六方结构的 α 相的硬度要相对比体心立方结构的 β 相更高^[19]。结合图 4 分析可知,当变形温度从 700 °C 升高到 750 °C 时,组织中的条状 α 相被破坏变细,硬度增加。而从 750 °C 到 900 °C 时, α 相发生球化,因而硬度下降。变形温度到 900 °C 之后发生动态再结晶明显,从而导致硬度上升。

图 7 是变形温度为 850 °C 时,不同应变速率下

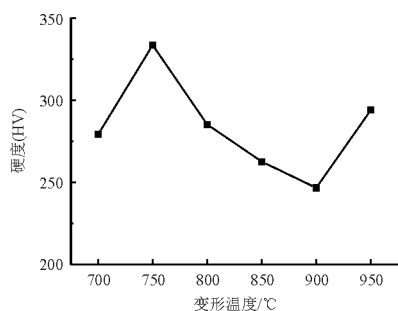


图6 不同变形温度下 SP700 钛合金的显微硬度

Fig.6 The microhardness of SP700 titanium alloy at different deformation temperatures

SP700 钛合金的显微硬度。可以看出,当变形温度为 850 °C 时,SP700 钛合金的硬度(HV)随应变速率的增大先增大后减小,且在应变速率为 0.1 s^{-1} 时最大,为 280.3。结合图 5 的微观组织分析可知,增大应变速率使得 α 相不易发生球化,从而硬度增大,但应变速率增大到 0.1 s^{-1} 后组织出现了明显的局部流动,致使钛合金的硬度开始下降。

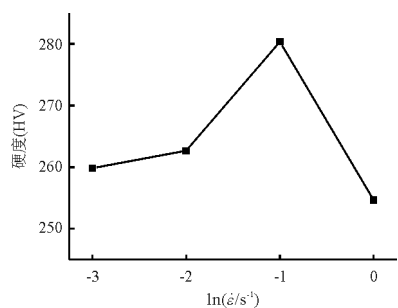


图7 不同应变速率下 SP700 钛合金的显微硬度

Fig.7 The microhardness of SP700 titanium alloy at different strain rates

3 结 论

(1)SP700 钛合金的峰值应力随着变形温度的升高而显著减小;随应变速率的增大而显著增大。

(2)SP700 钛合金显微组织中 α 相随变形温度的升高而球化率增大并最后发生动态再结晶;随应变速率的逐渐增大,SP700 钛合金显微组织中的 α 相球化率降低且最后呈现出局部流动现象。

(3)SP700 钛合金的显微硬度随显微组织中的 α 相含量及状态而变化。

参 考 文 献

- [1] 李毅,赵永庆,曾卫东.航空钛合金的应用及发展趋势[J].材料导报,2020,34(S1):280-282.
- [2] 刘世锋,宋玺,薛彤,等.钛合金及钛基复合材料在航空航天的应用和发展[J].航空材料学报,2020,40(3):77-94.
- [3] 田永武,朱乐乐,李伟东,等.高温钛合金的应用及发展[J].热加工工艺,2020,49(8):17-20.

- [4] 许爱军,万海峰,梁春祖,等.低温钛合金材料应用现状及发展趋势[J].精密成形工程,2020,12(6):145-156.
- [5] 李蒙,李晓燕,马家琨,等.SP700 钛合金板轧制过程的组织演变和力学性能研究[J].有色金属材料与工程,2019,40(3):31-38.
- [6] 张钢,张丰收.热处理工艺对 SP-700 钛合金组织性能的影响[J].中国有色金属学报,2010,20(S1):687-692.
- [7] 黄金昌.SP-700 钛合金的开发和应用[J].稀有金属与硬质合金,1998(3):58-62.
- [8] 党鹏,罗伟,李鹏,等.热处理对 SP700 钛合金板材组织及力学性能的影响[J].热加工工艺,2021,50(6):123-127.
- [9] 王悔改,李文博,李鑫鑫,等.SP700 钛合金的多重固溶时效处理[J].铸造技术,2014,35(9):1990-1993.
- [10] GUNAWARMAN B, NIINOMI M, AKAHORI T, et al. Mechanical properties of Ti-4.5Al-3V-2Mo-2Fe and possibility for healthcare applications[J]. Materials Science and Engineering, 2005, C25(3):296-303.
- [11] 王凌浩,杨斌,伍先明,等.变形参数对挤压态 AZ41M 镁合金热变形行为和组织演变的影响[J].材料热处理学报,2021,42(1):50-57.
- [12] 杨璐,曹敏,曹玲飞,等.7B04 包铝复合板热变形行为及其对组织演变的影响[J].材料工程,2021,49(3):78-86.
- [13] 刘桐,骆良顺,吴晓明,等.Ti-6Al-2.5V-1.5Fe-0.15O 合金热变形行为及组织演变[J].特种铸造及有色合金,2017,37(3):238-241.
- [14] PAGHANDEH M, ZAREI-HANZAKI A, ABEDI H R, et al. Compressive/tensile deformation behavior and the correlated microstructure evolution of Ti-6Al-4V titanium alloy at warm temperatures[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021(10):1291-1300.
- [15] 刘少飞,王柯.近 β 钛合金高温压缩变形过程中流变软化行为研究进展[J].材料工程,2017,45(2):119-128.
- [16] 杨晓康,王快社,史佳敏,等.TC17 钛合金高温变形行为研究[J].稀有金属材料与工程,2018,47(9):2895-2900.
- [17] 贾志强,曾卫东,王凯旋.TC17 钛合金热变形过程中片状组织球化演变及 Burgers 关系的破坏[J].稀有金属材料与工程,2017,46(10):2895-2899.
- [18] LIU H J, ZHANG Z M, XU K H, et al. Evolution of the α phase and microhardness for hot isostatic pressed Ti-6Al-4V alloy during multi-pass deformation [J]. Materials Characterization, 2021, 178:111263.
- [19] 李旭敏,方峰,蒋建清,等.形变影响 TC4 钛合金组织和性能演变的温度依赖性[J].稀有金属材料与工程,2019,48(10):3379-3386.

(编辑:刘晨辉)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com