

新型 Ti5321 合金片层组织的热变形行为

周伟¹, 赵永庆^{1,2}, 辛社伟¹, 李倩¹, 李磊¹, 张思远¹, 陈军¹, 王欢^{1,2}

(1. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

(2. 西北工业大学, 陕西 西安 710072)

摘要: 为研究具有原始粗片层组织的 Ti5321 合金热压缩变形过程中流变应力、显微组织等随变形条件的变化, 在 Gleeble-2800 型热模拟试验机上进行高温热压缩试验, 试验温度为 790 ~ 850 °C, 应变速率为 0.01 ~ 1 s⁻¹, 变形量为 30% ~ 70%。结果表明: Ti5321 合金的软化机制与片层组织球化和动态再结晶有关, 变形量和变形温度是影响合金片层组织球化及 β 再结晶的主要因素。同一变形温度和应变速率下, 随着变形量的增大, 会出现片层 α 相球化及 β 相再结晶现象。当应变速率和变形量相同时, 低温变形主要发生的是片层 α 相球化行为, 高温变形发生的是 β 相的再结晶。

关键词: 钛合金; 片层组织; 流变行为; 球化; 再结晶

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2018)05-020-04

Hot Deformation Behavior in Ti5321 Alloy with Coarse Lamellar Microstructure

Zhou Wei¹, Zhao Yongqing^{1,2}, Xin Shewei¹, Li Qian¹, Li Lei¹, Zhang Siyuan¹, Chen Jun¹, Wang Huan^{1,2}

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

(2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to study the change of flow stress and microstructure of Ti5321 alloy with original coarse lamellar microstructure, the hot compressive deformation behavior was investigated using Gleeble-2800 system thermal simulator machine. The test conditions were set as follows, the temperature range of 790 ~ 850 °C, the strain rate range of 0.01 ~ 1 s⁻¹ and the deformation range of 30% ~ 70%. The results show that the softening mechanism of Ti5321 alloy is related to the spheroidization and dynamic recrystallization of the lamellar α . The deformation amount and temperature are the main factors to influence the spheroidization behavior of lamellar α and dynamic recrystallization of β phase. When the deformation temperature and strain rate are the same, the spheroidization behavior of lamellar α and dynamic recrystallization of β phase occur with the increasing of the deformation amount. When the strain rate and deformation amount are the same, lamellar α spheroidizing behaviors mainly occur at the low temperature deformation, but recrystallization of β phase is happened at high temperature deformation.

Key words: titanium alloy; lamellar microstructure; deformation behavior; spheroidization; recrystallization

0 引言

Ti5321 合金是西北有色金属研究院开发的一种新型高强韧钛合金^[1], 该合金经强化热处理后抗拉强度超过 1 200 MPa, 并且具有良好的断裂韧性

($K_{IC} \geq 65 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), 相对于目前已成熟应用的高强韧钛合金来说, 该合金在强韧性能匹配上更能满足我国航空用损伤容限钛合金的要求。

金属材料在加工过程中受温度、变形量、应变速率等因素的影响, 而钛合金片层组织的热变形及其球化行为一直是国内外钛合金热加工领域研究的热点。Miller 等^[2]在 20 世纪 90 年代研究了 Ti-6Al-4V 合金片层组织在压缩和拉伸 2 种热加工方式下的变形行为, 研究发现, 受织构的影响, 合金片层组

收稿日期: 2018-01-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51471136); 国际科技合作项目(中法合作)(2015DFA51430)

通信作者: 周伟(1978—), 女, 教授级高工。

织拉伸变形较压缩变形应力峰值的软化程度大。陈慧琴等^[3]研究了 TC11 钛合金片层组织在两相区的热变形行为, 通过分析显微组织认为片层组织球化行为是变形应力软化引起的。周建华等^[4]研究了 TC17 钛合金热变形过程中片状组织的演变规律, 研究发现变形量对合金片状组织的球化起决定作用。吴成宝等^[5]通过研究 TA15 钛合金片层组织的热变形及组织球化行为发现, 合金变形应力对应变速率和温度敏感。综上表明, 钛合金片层组织在两相区变形, 热加工工艺参数对合金变形应力及组织演变具有重要的影响。作为新研制开发的 Ti5321 高强韧钛合金, 为了实现合金片状组织在 $\alpha + \beta$ 相区组织与性能的控制, 开展这方面变形行为及显微组织演变的研究是十分必要的。

1 实验

实验用原材料为 Ti5321 合金棒材, 其化学成分 ($w/\%$): Al 5.02、Mo 3.03、V 2.99、Cr 2.06、Nb 1.37、Zr 2.01、Fe 0.99、O 0.064、H 0.001 1、N 0.000 4、Ti 余量。采用金相法测得合金 α/β 相变点为 $860\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从 Ti5321 合金棒材上切取 $\phi 10\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ 试样, 经 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温 1 h 后以 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的冷却速度炉冷到 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后空冷。热处理后 Ti5321 合金棒材的显微组织为典型的魏氏片层组织^[6], 具有清晰完整的 β 晶界及晶内平直集束 α 片层结构, 如图 1 所示。将热处理后的 $\phi 10\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ 试样再加工成 $\phi 8\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的热压缩试样。热压缩试验在 Gleeble-2800 型热模拟实验机上进行, 试验温度为 $790 \sim 850\text{ }^{\circ}\text{C}$, 应变速率为 $0.01 \sim 1\text{ s}^{-1}$, 变形量为 $30\% \sim 70\%$, 试样变形

后水冷。将热压缩后的试样沿垂直于压缩方向剖制成金相试样, 再经粗、细磨及抛光处理后, 用 $5\% \text{ HF} + 15\% \text{ HNO}_3 + 80\% \text{ H}_2\text{O}$ (体积分数) 的 Kroll 腐蚀液^[7] 腐蚀, 采用 OLYMPUSPM-G3 型金相显微镜进行显微组织观察。

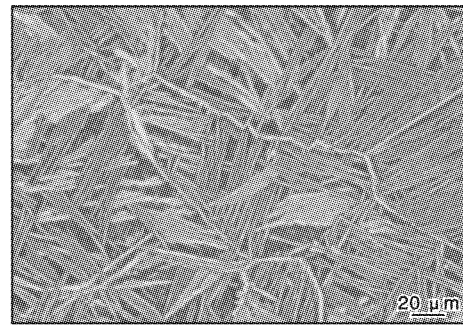


图 1 Ti5321 合金棒材的初始片层组织

Fig. 1 Original lamellar microstructure of Ti5321 alloy bar

2 结果与讨论

2.1 应力-应变曲线

图 2 为 Ti5321 合金试样在不同试验条件下经热压缩变形得到的真应力-真应变曲线。由图 2 可以看出, 不同变形条件下获得的真应力-真应变曲线形状特征基本相似, 即在变形的初始阶段应力随应变的增加而增大, 当应力达到峰值或出现上、下屈服点后应力随应变的增加而减小并逐渐趋于稳定。初始变形时应力增加是变形过程中位错迅速增殖导致的加工硬化的结果, 而随后的软化行为则与片层组织球化和动态再结晶有关^[8]。当硬化和软化效应达到动态平衡时, 变形进入稳态流变阶段。

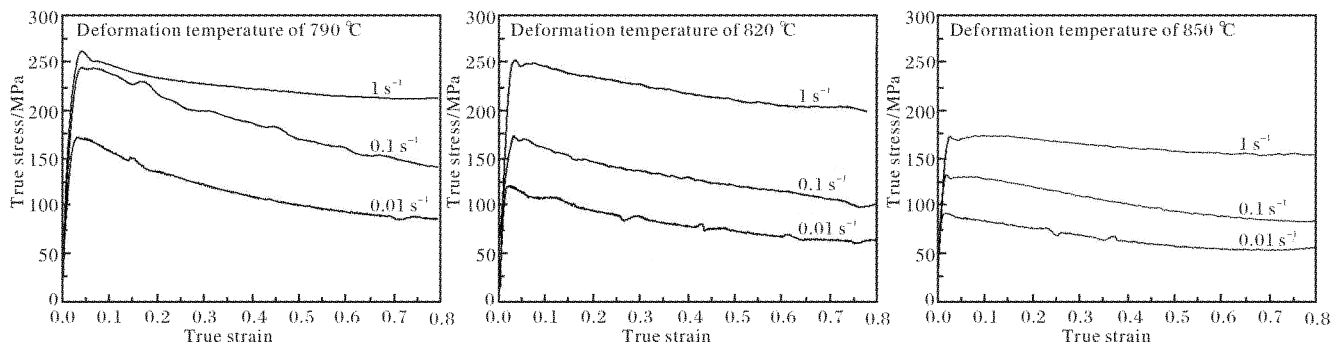


图 2 Ti5321 合金试样在不同变形条件下的真应力-真应变曲线

Fig. 2 The true stress-true strain curves of Ti5321 alloy specimens at different deformation conditions

由图 2 还可以发现, 当变形温度一定时, 应变速率越大, 其流变应力的峰值越大。例如, 当变形温度为 $820\text{ }^{\circ}\text{C}$, 应变速率为 0.01 s^{-1} 和 1 s^{-1} 时的流

变应力峰值分别为 118.52 MPa 和 249.41 MPa , 两者差值为 130.89 MPa 。这是由于随着应变速率增加, 动态软化行为得不到充分进行而导致应力增大^[9]。

同一应变速率下,流变应力随变形温度的升高而降低。例如,应变速率为 0.1 s^{-1} ,变形温度由 $790 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高到 $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,其真应力峰值降低了 112.8 MPa ,说明 Ti5321 合金属于热敏感型合金^[10]。

2.2 显微组织演变

图 3 为 Ti5321 合金试样在不同试验条件下经热压缩变形后的显微组织。由图 3 可以看出,变形程度和变形温度对合金的组织形貌影响很大。同一变形温度和应变速率下,当变形量较小(30%)时, α 片层发生扭曲并且被拉长,片层厚度变薄,局部片层组织被打碎成细小颗粒状球化组织,但由于变形

程度较小,显微组织仍以片层组织为主(图 3a)。与 30% 压缩变形组织相比,50% 变形后的组织变化明显, α 片层不再是连续的整体形貌。随着变形量的增大,局部大的剪切和扭转变形使 β 相沿着剪切带深入 α 相,同时 α 相存在明显的球化趋势,等轴 α 颗粒的数量较 30% 变形时增加,如图 3b 所示。当变形量增大到 70% 时,由于变形程度增大,具有较高层错能^[11]的 β 相在变形时发生攀移和交滑移,形成多边形化^[12]的再结晶组织,组织中已经观察不到片状组织痕迹,破碎的 α 晶粒短时间内不能长大,组织为细小椭球状颗粒,如图 3c 所示。

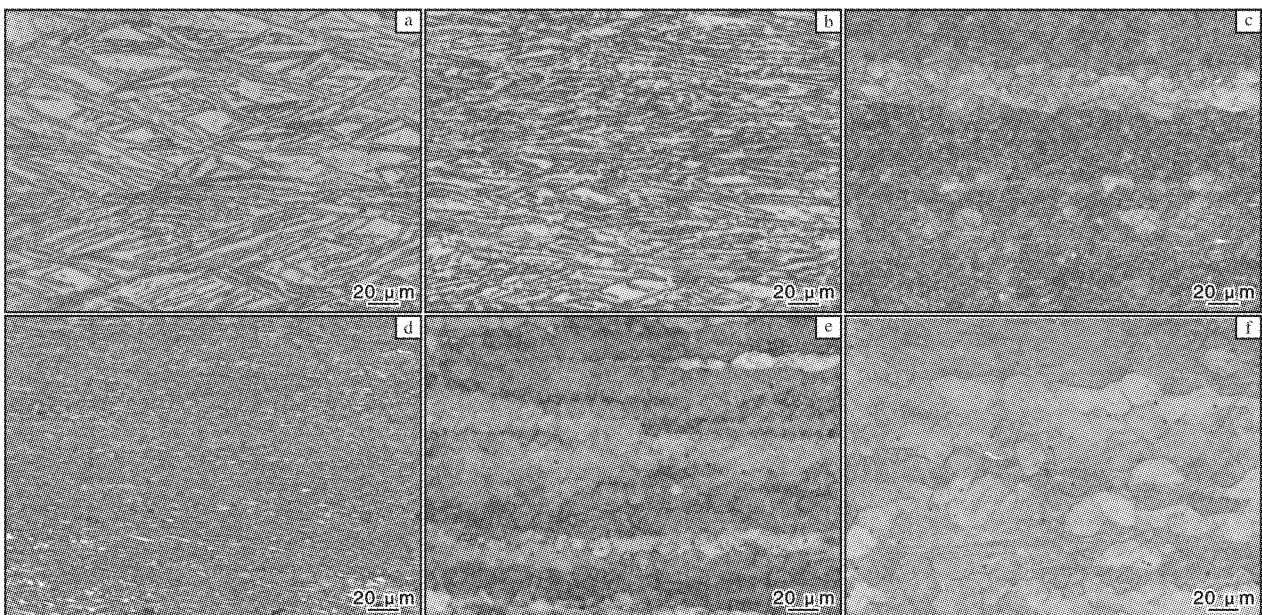


图 3 Ti5321 合金试样不同变形条件下热压缩变形后的显微组织

Fig. 3 Microstructures of Ti5321 alloy specimens after hot compression at different deformation conditions:

- (a) $820 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 0.1 s^{-1} , 30%; (b) $820 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 0.1 s^{-1} , 50%; (c) $820 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 0.1 s^{-1} , 70%;
(d) $790 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 0.1 s^{-1} , 70%; (e) $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 0.1 s^{-1} , 70%; (f) $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 0.01 s^{-1} , 70%

当应变速率和变形量相同时,在试验范围内的 3 个不同温度变形后其主要变形区域微观组织中都观察到了等轴组织形貌,但是 $790 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 变形形成的是片层 α 相球化组织(图 3d),而其它 2 个温度发生了 β 相的再结晶(图 3c、3e),并且随着变形温度的升高,再结晶晶粒呈现粗化、长大趋势。由于钛合金导热性差, $\alpha + \beta$ 相区变形温度较高时,变形热导致的温升会使合金发生 $\alpha \rightarrow \beta$ 相转变,在随后的快速冷却中出现大量针状马氏体组织。

同一变形温度和变形量时,再结晶晶粒尺寸随着应变速率的增大而减小(图 3e、3f)。郭强等人^[13]认为,应变速率越大,金属变形过程中储存的畸变

能越大,导致再结晶形核区域增多,晶粒细化。

3 结 论

(1) 在所有试验设定的热压缩变形条件下, Ti5321 合金试样的应力-应变行为均表现出先硬化后软化的曲线特征,变形硬化是位错增殖导致的,而软化则与片层组织球化和动态再结晶有关。

(2) Ti5321 合金试样在热压缩变形时,应变速率和变形温度对合金变形抗力影响较大,该合金属于应变速率敏感型和热敏感型合金。

(3) 变形量和变形温度是影响 Ti5321 合金片层组织球化及 β 再结晶的主要因素。同一变形温度和

应变速率下,随着变形量的增大,片层 α 相发生球化及 β 相再结晶现象。当应变速率和变形量相同时,低温变形主要发生片层 α 相球化行为,高温变形发生的是 β 相的再结晶。

(4)应变速率对 Ti5321 合金再结晶晶粒尺寸影响较大,同一变形温度和变形量时,再结晶晶粒尺寸随着应变速率的增大而减小。

参考文献

- [1] 赵永庆, 马朝利, 常辉, 等. 1200MPa 级新型高强韧钛合金[J]. 中国材料进展, 2016, 35(12): 914-918.
- [2] Miller R M, Bieler T R, Semiatin S L. Flow softening during hot working of Ti-6Al-4V with a lamellar colony microstructure [J]. Scripta Materialia, 1999, 40(12): 1387-1393.
- [3] 陈慧琴, 曹春晓, 郭灵, 等. TC11 钛合金片层组织热变形球化机制[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(3): 421-425.
- [4] 周建华, 王晓英, 徐斌, 等. TC17 钛合金热变形过程中片状组织演变规律[J]. 钛工业进展, 2012, 29(5): 15-18.
- [5] 吴成宝, 杨合, 孙志超, 等. 片层组织 TA15 钛合金的热变形行为及组织球化[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(专辑1): 94-99.
- [6] Jones N G, Dashwood R J, Jackson M, et al. β phase decomposition in Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr [J]. Acta Materialia, 2009, 57(13): 3830-3839.
- [7] Li C L, Mi X J, Ye W J, et al. Influence of heat treatment on microstructure and tensile property of a new high strength beta alloy Ti-2Al-9.2Mo-2Fe [J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 580: 250-256.
- [8] 王华, 冀胜利, 王凯旋, 等. 片层组织 TC17 钛合金高温变形行为研究[J]. 钛工业进展, 2010, 27(6): 16-19.
- [9] 王国, 惠松晓, 叶文君, 等. Ti-3.0Al-3.7Cr-2.0Fe 低成本钛合金的热压缩变形行为[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(8): 2223-2229.
- [10] 许国栋. TA15 钛合金的热压缩变形性能[J]. 金属学报, 2002, 38(增刊): 230-232.
- [11] 张效宁, 宋杰, 范志国. Beta Ti-9.8Mo-3.9Nb-2V-3.1Al 合金的热压缩变形行为研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2009, 30(1): 10-13.
- [12] 张慧儒. TC11 钛合金热压缩变形行为与组织和织构演变研究[M]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [13] 郭强, 严红革, 陈振华, 等. AZ31 镁合金高温热压缩变形特征[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(6): 900-906.

国内外新闻

河北省承德市与河钢集团共建国际化钒钛产业基地

9月17日,河北省承德市政府与河钢集团有限公司(以下简称河钢集团)签署战略合作框架协议,共同出资组建河钢承德钒钛新材料有限公司。双方将在优化钒钛资源配置、提升科技创新能力、延伸产业链条等方面展开合作,打造具有可持续发展能力的国际化钒钛产业基地。

承德是我国重要的钒钛资源基地,是国家发改委、科技部认定的国家钒钛资源综合利用产业基地和国家钒钛新材料高新技术产业化基地。河钢集团是我国特大型钢铁材料制造和综合服务商,拥有世界首条亚熔盐法清洁提钒生产线。

按照规划,河钢承德钒钛新材料有限公司将以项目建设为抓手,着力推进实施亚熔盐提钒产品深加工、航空级片钒开发等14项重点项目建设,延伸产业链条,实现钒钛产品高端化,打造国际化钒钛产业基地。到“十三五”末,含钒特钢、含钒合金钢、钒基材料、钛基材料年产量分别达到90万吨、665万吨、2.5万吨和6.2万吨,建成承德钒钛新材料产业基地。

(来源:河北日报)