

Ti14 合金半固态变形后热稳定性的研究

屈可朋¹, 陈永楠¹, 魏建锋¹, 赵永庆², 王 慧¹

(1. 西安交通大学 金属材料强度国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

(2. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘 要: 以新型阻燃钛合金 Ti14(α +Ti₂Cu)为对象, 对比研究常规和半固态加工后合金的热稳定性。结果表明: 热暴露时间不超过 150 h 时, 半固态加工试样的强度明显优于常规加工试样, 且塑性相差不大。而热暴露 200 h 后两种状态加工的合金热稳定性相近。常规加工态, Ti₂Cu 相以颗粒状弥散分布于晶内; 半固态加工, Ti₂Cu 相熔化并在冷却过程中以条状偏析于晶界, 使得断口韧窝粗化并出现少量解理条纹, 这是导致合金热稳定性能改变的重要因素。

关键词: Ti14 合金; 半固态变形; 微观组织; 热稳定性

中图分类号: TG146.2⁺³

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)07-1301-03

自 20 世纪 70 年代初期半固态成形技术被提出以来^[1], 半固态成形技术得到迅速发展, 并被誉为 21 世纪新一代金属成形技术。目前镁、铝合金及钢的半固态成形已经取得许多有益的结果^[2~5], 而对具有重要用途的钛合金半固态成形技术的研究, 除西北有色金属研究院 Zhao^[6,7]等通过热模拟初步探索 Ti14^[8]合金半固态氧化和变形行为外, 尚未见报道。钛合金一般是在压力作用下成形, 而对于钛合金在半固态成形后的相关力学性能的基础研究, 仍旧是国内外的空白。因此, 本试验在前期热模拟的基础上, 以 Ti14 合金为对象, 研究该合金经固态和半固态变形后热稳定性能的变化, 分析引起其变化的原因, 旨在为钛合金半固态加工领域提供理论基础。

本研究所用 Ti14 合金是具有我国自主知识产权的一种新型阻燃合金, 主要用作航空发动机材料, 高温和承载的综合服役条件要求该合金具有较好的高温性能, 尤其是热稳定性能, 它决定了合金的使用寿命和发动机的可靠性。Ti14(Ti-Al-Cu-Si, Cu 含量超过 10%)合金是一种 α +Ti₂Cu 形式的钛合金^[9,10], Ti₂Cu 相熔点为 990 °C, 超过 990 °C 的该合金为半固态。

1 实 验

将 Ti14 合金的 25 kg 铸锭, 经常规开坯锻造至 $\Phi 40$ mm 棒材后, 再分别经常规(950 °C)和半固态(1000 °C)锻造至 $\Phi 25$ mm(变形量: 60%), 试样经喷水冷却, 以保持高温变形组织。合金经热处理(810 °C, 0.5 h,

水淬+450 °C, 8 h, 空冷)后, 加工成标准拉伸试样, 并在 300 °C 分别暴露 50~200 h 后, 测试室温拉伸性能, 所有的力学性能均在 Instron1195 电子拉伸机上进行测试, 试样尺寸如图 1 所示。

按照钛合金试样加工方法制备金相和透射试样, 分别采用 OLMPUS PMG 光学显微镜(Optical microscopy, OM), JSM-6460 扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscopy, SEM)和 JEM-200CX 透射电子显微镜(Transmission Electron Microscopy, TEM)观察合金热暴露后的显微组织和断口形貌。

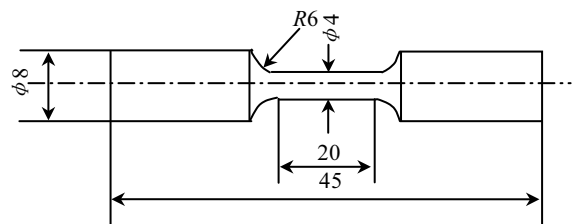


图 1 拉伸试样尺寸

Fig.1 Dimension of sample for tensile testing

2 结果及分析

2.1 力学性能

Ti14 合金分别经常规和半固态加工, 在 300 °C 暴露不同时间后的室温拉伸性能如表 1 所示。当热暴露

收稿日期: 2008-06-27

基金项目: 重大基础研究前期研究专项项目(2005CCA06400)和国家“973”项目(2007CB613807)

作者简介: 屈可朋, 男, 1983 年生, 硕士生, 西安交通大学 金属材料强度国家重点实验室, 陕西 西安 710049, 电话: 029-82664764, E-mail: kpqu_xjtu@stu.xjtu.edu.cn

时间不超过 150 h 时, 半固态加工合金的强度明显优于常规加工合金, 其中: 热暴露 50 h 后抗拉强度较常规加工合金提高了 8.1%, 屈服强度升高 11%; 150 h 后屈服强度增幅达到 13%, 而塑性相差不大。热暴露 200 h 后两种状态加工的合金热稳定性相近。随热暴露时间的延长, 两种状态的合金塑性都下降, 抗拉强度呈现先升高后降低的趋势, 该现象与一般钛合金热处理的时效特征较为相似^[11]。

表 1 Ti14 合金在 300 °C 暴露不同时间后的力学性能

Table 1 Mechanical properties of Ti14 alloy after thermal exposure for different time

Forging way ($\epsilon=60\%$)	Time/h	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta/\%$	$\psi/\%$
Conventional (950 °C)	50	865	740	9.5	20.5
	150	970	835	3.2	10.5
	200	955	820	7.5	19
Semi-solid(1000 °C)	50	935	825	9	18.5
	150	1030	945	2.5	6.5
	200	950	835	6.5	16.5

2.2 组织分析

图 2 为 Ti14 合金经两种状态加工, 在 300 °C 热暴露 50~200 h 后的显微组织。常规加工时试样中无液相, 原始拉长的组织通过动态再结晶形成等轴晶粒, 经热暴露后晶内仍然弥散分布着颗粒状的 Ti_2Cu 相(图 2a~2c); 半固态加工时, 变形温度高于 Ti_2Cu 相的熔点(990 °C), 试样中开始析出液相, 试样变形前的原始大晶粒依然存在, 晶粒形状不规则, 晶界析出大量条状的 Ti_2Cu 相。由于 Cu 元素在晶界处的偏聚^[12], 导致析出相和基体中 Cu 元素的浓度差, 增加了 Ti_2Cu 相长大驱动力。随暴露时间延长, 晶界处析出 Ti_2Cu 相明显长大, 导致晶界的粗化(图 2e,2f)。

2.3 断口分析

两种加工态合金热暴露后的断口形貌如图 3 所示。常规加工的试样, 热暴露后断口主要为细小的韧窝, 韧窝密度较大(图 3a); 半固态锻造试样热暴露后拉伸断口仍以韧窝为主, 但韧窝粗大, 并伴随着少量解理条纹(图 3b)。分析认为: 韧窝大小、深浅及数量取决于材料断裂时析出相粒子的大小、间距, 数量及试验温度。常规加工态 Ti_2Cu 相弥散分布于晶内; 半固态加工态, 液相在压力作用下重新分布并于冷却过程中偏聚于晶界, 使得析出相粗化, 间距变大, 与常规加工表现出不同的析出相形态, 从而导致两者断口形貌的差异。

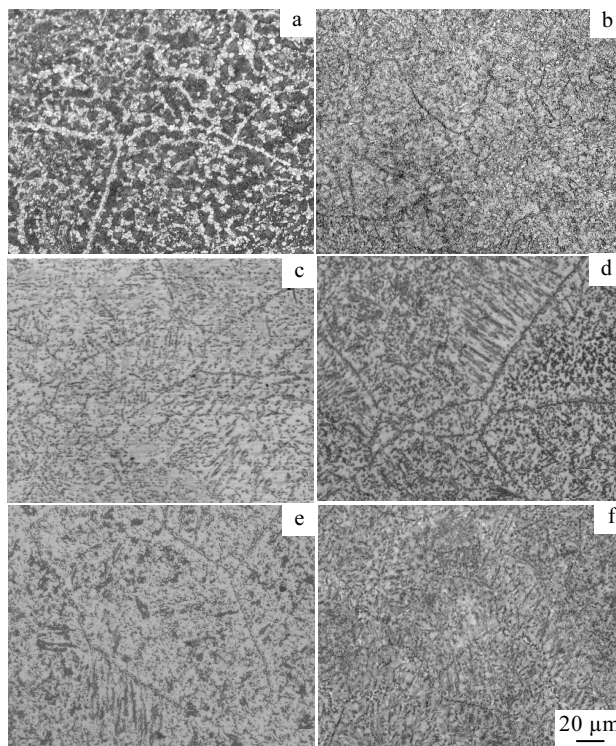


图 2 常规和半固态试样锻造并经热暴露后的组织形貌

Fig.2 Optical micrographs of conventional (a), (b), (c) and semi-solid (d), (e), (f) forging after thermal exposure at 300 °C for 50 h, 150 h and 200 h, respectively

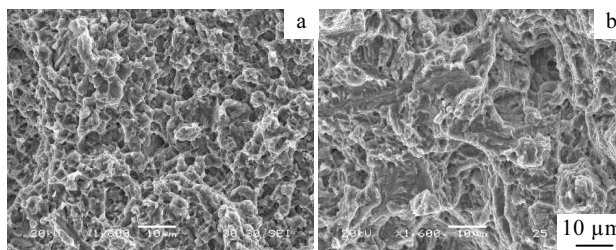


图 3 常规和半固态试样锻造并经热暴露后的断口形貌

Fig.3 The SEM fractographs of conventional (a) and semi-solid (b) forging after thermal exposure at 300 °C for 150 h

3 讨论

目前关于钛合金热稳定性能的研究均是基于常规固态加工的基础上, 总的规律为: 随暴露时间的延长, 合金力学性能下降, 塑性明显降低。这主要是“组织稳定性”和“表面稳定性”的共同作用。组织不稳定是指在使用过程中合金的组织结构发生变化而使合金变脆, 其中析出相的形态、位置和数量是影响组织稳定性的重要因素^[13,14]。常规加工试样经热暴露后, Ti_2Cu 颗粒弥散分布, 大量位错集中在晶内, 位错线长程分布, 晶界附近有少量位错塞积(图 4a)。半固态

加工试样,沿晶界有较多条状 Ti_2Cu 相,在随后的拉伸过程中,当位错遇到 Ti_2Cu 相时发生交互作用,不仅破坏了有序结构而引入有序能,而且使得相邻位错在同一滑移面内运动所需的应力变小,位错更容易在已活动的滑移面上运动,大量的位错集中在较少的滑移面内,使得晶界和晶内发生位错塞积,形成位错胞或位错墙(图 4b),导致加工硬化,使得合金强度升高。另一方面,大量塞积的位错及不断长大的 Ti_2Cu 相又使得合金塑性随暴露时间的延长明显下降。

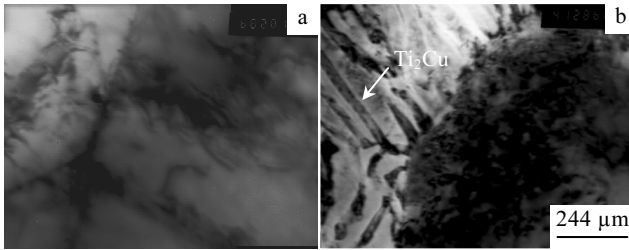


图 4 常规和半固态试样锻造并经热暴露后的透射电镜照片
Fig.4 TEM images of conventional (a) and semi-solid (b) forging after thermal exposure at 300 °C for 50 h

4 结 论

1) 热暴露时间不超过 150 h 时,半固态加工试样的强度明显优于常规加工试样,且塑性相差不大。热暴露 200 h 后两种状态加工的合金热稳定性相近。

2) 常规加工态, Ti_2Cu 相以颗粒状弥散分布于晶内;随加工温度升高, Ti_2Cu 相开始熔化,液相在压力作用下重新分布,冷却过程中以条状偏析于晶界,

使得热暴露断口韧窝粗化并出现少量解理条纹,这是导致合金热稳定性能改变的重要因素。

参考文献 References

- [1] Flemings M C. *Metal Trans*[J], 1991, 22B(6): 269
- [2] Mabuchi M *et al. Acta Mater*[J], 1998, 46(15): 5335
- [3] Chino Y *et al. Acta Mater*[J], 2003, 51: 3309
- [4] Eskin D G *et al. Progress in Materials Science*[J], 2004, 49: 629
- [5] Mohamed Ramadan *et al. Materials Science and Engineering: A*[J], 2006, 430: 285
- [6] Zhao Y Q *et al. Materials Science and Engineering: A*[J], 2004, 373: 315
- [7] Zhao Y Q *et al. Materials Science and Engineering: A*[J], 2006, 416: 181
- [8] Zhao Yongqing(赵永庆) *et al. Chinese Defence Patent: 97112302.0*[P], 1997
- [9] Zhao Yongqing(赵永庆) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 1998, 27(6): 360
- [10] Zhu K Y *et al. Journal of Materials Science*[J], 2000(35): 5609
- [11] Xin Shewei(辛社伟) *et al. Heat Treatment of Metals(金属热处理)*[J], 2006, 31(9): 39
- [12] Zhao Yongqing(赵永庆) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2005, 34 (4): 531
- [13] Zhu Kangying(朱康英). *Study on Thermal Stability of Ti-V-Cr Burn-Resistant Alloys(Ti-V-Cr 阻燃钛合金热稳定性研究)*[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2002
- [14] Zhao Yongqing(赵永庆) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)* [J], 2003, 32 (8): 610

Research on Thermal Stability of Ti14 Alloy after Semi-Solid Deformation

Qu Kepeng¹, Chen Yongnan¹, Wei Jianfeng¹, Zhao Yongqing², Wang Hui¹

(1. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

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

Abstract: The thermal stability of Ti14, a new typical $\alpha+Ti_2Cu$ burn resistant alloy, after conventional forging and semi-solid forging (SSF) were investigated. The results revealed that under the condition of thermal exposure time no more than 150 h, Ti14 alloy after SSF had higher tensile strength than that of conventional one and the plasticity of the two forging state was similar. Up to 200 h, these two states alloy had similar thermal stability. The Ti_2Cu particles distributed in grains uniformly after conventional forging; While in the process of SSF, Ti_2Cu phases melted and precipitated on the grain boundaries as banding precipitations during cooling, which formed coarse dimples and few cleavages in microfracture, leading to the change of thermal stability.

Key words: Ti14 alloy; semi-solid deformation; microstructure; thermal stability

Biography: Qu Kepeng, Candidate for Master, State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China, Tel: 0086-29-82664764, E-mail: kpqu_xjtu@stu.xjtu.edu.cn