

Ti14 合金半固态变形组织及力学性能

陈永楠¹, 魏建锋¹, 赵永庆², 屈可朋¹, 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 Ti14 合金 (α +Ti₂Cu) 为研究对象, 分别进行常规固态锻造 (950 °C) 和半固态锻造 (1000 °C), 对比研究合金半固态变形的组织和拉伸性能, 并讨论可能引发组织和拉伸性能变化的原因。结果表明: 半固态锻造过程未发生动态再结晶, 使得室温组织晶粒粗大, 液相 Ti₂Cu 在压力作用下沿晶界分布, 形成了偏析, 粗化了晶界, 改变了晶界的结构; 晶界结构的变化诱发了晶界的硬化效应, 使得室温拉伸的强度升高, 塑性降低。

关键词: Ti14 阻燃合金; 半固态变形; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG146.2⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)10-1822-04

目前的钛合金正向高性能、低成本方向发展, 降低钛合金的成本主要有两条途径, 一是合金成分, 二是加工。利用廉价的合金元素研制低成本钛合金只能降低成本的 11% 左右^[1], 加工是降低成本的根本途径, 这种需要促进了钛合金基础和应用的研究, 其中半固态钛合金成形是一个重要的研究方向。当前铝合金和镁合金半固态成形技术已经基本成熟, 并取得了重大的应用进展^[2-4], 钢铁的半固态成形还在初步研究过程中^[5,6], 然而钛合金的半固态成形技术尚无报道。为了揭示半固态钛合金成形技术的特性, Y. Q. Zhao 研究了钛合金在半固态条件下的氧化和变形行为, 分析了钛合金半固态条件下变形的特点, 其成果为该技术的应用奠定了基础^[7,8]。半固态钛合金一般是在压力作用下成形, 但目前对于压力下的半固态钛合金的组织特征及力学性能, 仍然知之甚少。为了加深对半固态钛合金的组织 and 力学性能的认识, 本实验以新型阻燃合金 Ti14 为研究对象, 对比研究了固态和半固态下变形后组织和力学性能的变化, 旨在增加钛合金半固态加工方面的基础知识, 突破传统钛合金加工技术, 降低钛合金的加工成本。Ti14 含有 Ti₂Cu 相, 熔点在 990 °C, 1000 °C 之上为半固态^[9,10]。

1 实 验

将 25 kg Ti14 合金铸锭, 经常规开坯锻造至 $\phi 40$ mm 棒材后, 分两条途径进行变形加工: 一是半固态

(1000 °C) 锻造至 $\phi 25$ mm 的棒材, 二是常规 (950 °C) 锻造至 $\phi 25$ mm 的棒材。利用 Instron1195 电子拉伸试验机测试合金加工态的室温拉伸性能, 试样尺寸如图 1 所示。采用 OLYMPUS GX71 金相显微镜和 JSM-6460 型扫描电子显微镜观察合金微观组织结构和断口形貌, 利用 JEM-200CX 透射电子显微镜观察合金断口 0.5 mm 处晶界位错组态。

2 实验结果

2.1 显微组织

图 2 为 Ti14 合金常规加工态和半固态锻造的显微组织。合金在常规锻造时, 试样中没有液相, 变形以固相塑变为主, 原始拉长的组织通过动态再结晶形成等轴晶粒, 并伴随晶粒长大; 晶内组织为弥散细小的 α +Ti₂Cu, 晶界清晰; 1000 °C 下半固态锻造, 变形温度高于 Ti₂Cu 熔点 (990 °C), 试样中存在液相分数较

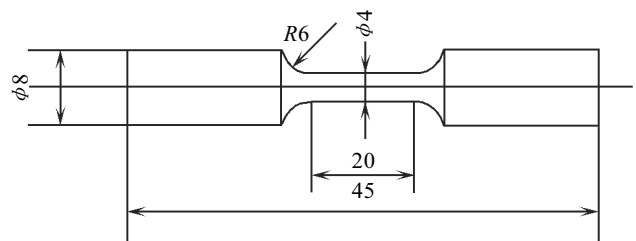


图 1 拉伸试样尺寸 (mm)

Fig1 Dimension of the sample for tensile testing

收到初稿日期: 2008-09-23; 收到修改稿日期: 2009-06-21

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

作者简介: 陈永楠, 男, 1981 年生, 博士, 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: chen Yongnan@stu.xjtu.edu.cn

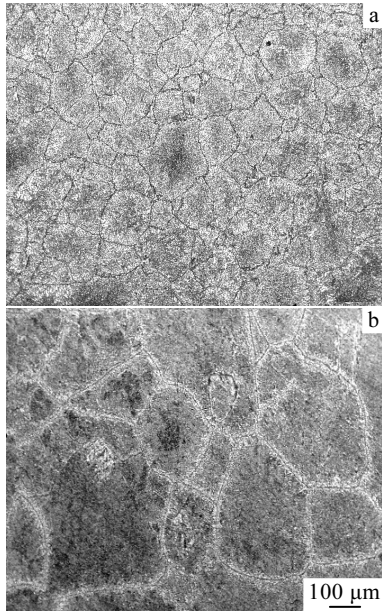


图 2 Ti14 合金常规锻造和半固态锻造后的显微组织

Fig.2 OM photographs of Ti14 alloys after conventional(a) and semi-solid(b) forging

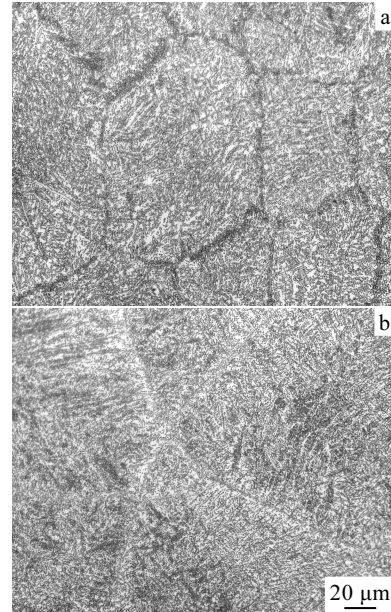


图 3 Ti14 合金常规和半固态锻造后的晶界

Fig.3 Grain boundaries of Ti14 alloy after conventional(a) and semi-solid(b) forging

少, 变形仍以固相塑变为主, 变形过程中未发生动态再结晶^[11,12], 分析可能是由于变形过程中液相起到了润滑协调的作用, 降低了晶粒间的摩擦, 使得变形无法达到临界变形量, 因此试样变形前的原始大晶粒依然存在。但晶界宽化, 较为模糊, 晶界角增大, 晶粒形状不规则, 一些晶粒连接在一起。可能由于半固态锻造使形变织构增强, 晶粒内部组织粗化, 变形体内产生了大量的低角度和低能量的边界, 这些边界在锻造过程中增加了固相间晶粒重新焊合的可能性, 形成较大晶粒。

半固态变形后组织变化的另一个特征是晶界的粗化。图 3a, 图 3b 分别为常规锻造和半固态锻造组织的晶界。常规锻造晶界清晰可见, 晶界形态较细, 晶内存在针状析出相; 半固态锻造后的晶界由大量的针状的析出物组成, 析出物在晶界呈一定角度生长, 晶内的析出物减少, 说明发生了晶界偏析, 导致了晶界的粗化。

2.2 拉伸性能

静拉伸是反映材料在静载荷下的力学行为, 可以获得许多刚性、强度设计的重要指标, 同时通过对拉伸过程及断口的分析, 可以表征材料的组织和宏观性能及试验条件的耦合性能。表 1 为 Ti14 合金半固态加工与常规加工态的室温拉伸性能。与常规锻造相比, 半固态加工后合金的强度明显升高, 塑性降低, 半固态下变形后试样的抗拉强度提高了 25.3%, 屈服强度升高 38.4%, 延伸率和断面收缩率降低 83.3%和 67.2%, 表明半固态变形使得 Ti14 合金产生了加工硬化。1000 °C 变形量 60% 的试样抗拉强度为 990 MPa, 屈服强度为 865 MPa。

2.3 断口形貌

组织的变化不仅影响室温的变形行为, 还影响室温断裂方式。半固态和常规加工态试样的拉伸断口形貌如图 4 所示。常规锻造试样的断口无晶界的特征, 是第二相粒子诱发的韧窝型断口 (图 4a), 韧窝均匀

表 1 Ti14 合金锻造后的室温拉伸性能

Table 1 Tensile properties of Ti14 alloy bar as-forging at room temperature

Forging way	UTS/MPa	ΔUTS/%	YS/MPa	ΔYS/%	El/%	ΔEl/%	RA/%	ΔRA/%
Conventional (950 °C)	790	—	625	—	15	—	32.0	—
Semi-solid (1000 °C)	990	25.3	865	38.4	2.5	-83.3	10.5	67.2

Note: (1) UTS, tensile strength; YS, yield strength; El, elongation; RA, reduction in area. (2) ΔUTS(%)=

$$(UTS_{\text{semi-solid}} - UTS_{\text{conventional}}) / UTS_{\text{conventional}} \times 100\%, \Delta YS(\%) = (YS_{\text{semi-solid}} - YS_{\text{conventional}}) / YS_{\text{conventional}} \times 100\%,$$

$$\Delta El(\%) = (El_{\text{semi-solid}} - El_{\text{conventional}}) / El_{\text{conventional}} \times 100\%, \Delta RA(\%) = (RA_{\text{semi-solid}} - RA_{\text{conventional}}) / RA_{\text{conventional}} \times 100\%$$

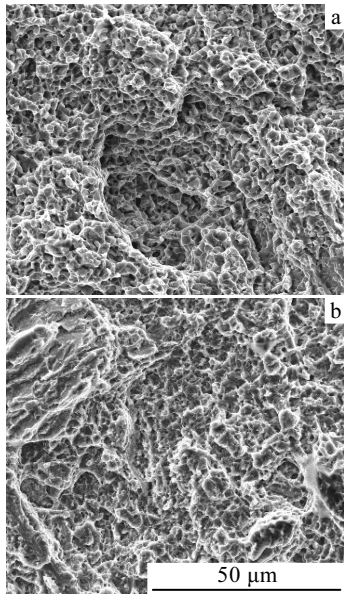


图 4 Ti14 合金拉伸断口形貌

Fig.4 Tensile fractographs of Ti14 alloy after conventional(a) and semi-solid(b) forging

分布且密度较高，并带有失稳断裂时的撕裂痕，是典型的穿晶断裂，表明试样具有较好的塑性；半固态变形后，试样室温下的主要破坏方式为穿晶断裂，伴随少量的沿晶特征，断口微观形貌以较大的韧窝为主，韧窝明显被拉长，小的韧窝合并使得韧窝密度减小，出现部分小平面（图 4b）。结合前面的分析，可以判断该过程中少量液相流动汇集在三叉晶界处，产生了部分的晶界脆化，使得断裂发生在脆化的晶界处。

3 讨论

根据 Ti 基高温合金中 Ti_2Cu 固溶体的溶解度曲线及 Ti_2Cu 相析出规律^[13,14]，Ti14 合金含有较高的 Ti_2Cu 形成元素 Cu，常规加工过程中冷却经历的路径短，扩散困难，因此低温下由 β 固溶体中均匀析出 Ti_2Cu 相的尺寸较小；半固态条件下，液相在压力的作用下沿晶分布，因而在连续冷却时固溶体中 Ti_2Cu 形成元素 Cu 会处于过饱和状态，使得在冷却过程中 β 固溶体中进一步共析出 Ti_2Cu 相。此时析出的 Ti_2Cu 相不是以均匀的形核方式从固溶体中析出，而是借助于高温析出 Ti_2Cu 相和基体的界面，其形核可以依附于高温析出 Ti_2Cu 相界面，从而降低了表面能和弹性应变能，加之此处 β 固溶体的过饱和度较大，析出相的生长驱动力增加，使得析出的 Ti_2Cu 长大速度较快，因此形成针状沿晶分布的 Ti_2Cu 相，产生了晶界的 Ti_2Cu 偏析，粗化了晶界。

晶界的 Ti_2Cu 偏析改变了晶界的结构，产生了强化作用，强化的过程是基体中位错与第二相或晶界的交互作用产生的^[15]，要讨论位错迁移的响应，有必要了解半固态变形后试样室温拉伸中的位错组态。图 5 为不同温度变形后拉伸断口处晶界的位错组态。其中图 5a 为常规加工后试样拉伸断口处的位错组态。晶内存在大量位错，位错线长程分布，晶内弥散的黑色颗粒为 Ti_2Cu 相，少量位错与 Ti_2Cu 相缠结，位错在晶界处堆积，晶界另一侧未见有位错产生。半固态变形后拉伸时试样晶内的位错明显减少，晶界析出了少量的针状析出相，位错集中缠结在析出相周围，晶内的位错绕过了弥散的第二相做长程运动，直至与晶界的析出相作用(如图 5b 所示)。说明半固态条件下晶内弥散的 Ti_2Cu 颗粒较少，位错作用不明显， Ti_2Cu 相的晶界偏析，使得位错在晶界受 Ti_2Cu 相表面钉扎，产生了硬化作用，因此强度升高，塑性降低。

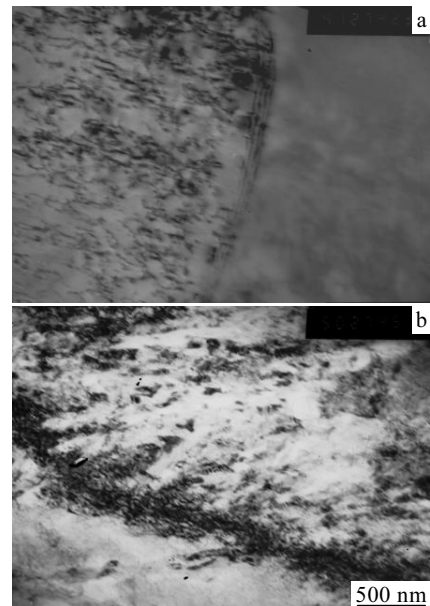


图 5 室温拉伸断口处晶界的位错组态

Fig.5 Configuration of dislocations at grain boundary after conventional(a) and semi-solid(b) forging

4 结论

- 1) Ti14 合金半固态变形过程中未发生动态再结晶，使得室温晶粒粗大， Ti_2Cu 相沿晶界分布发生了晶界偏析，促使晶界粗化，具有典型的半固态变形组织特征。
- 2) 半固态变形中晶界的偏析产生了硬化作用，使得室温拉伸强度明显增大，塑性下降，常规锻造后室温拉伸断裂方式为穿晶断裂，半固态锻造试样室温拉

伸断口出现部分沿晶断裂特征。

参考文献 References

- [1] Ma Xuedan(马雪丹), Zhao Yongqing(赵永庆), Zhou Lian(周廉) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2004, 33(4): 385
- [2] Mabuchi M, Iwasaki H, Higashi K. *Acta Mater*[J], 1998, 46: 5335
- [3] Chino Y, Kobata M, Iwasaki H. *Acta Materialia*[J], 2003, 51: 3309
- [4] Eskin D G, Suyitno, Katgerman L. *Progress in Materials Science*[J], 2004, 49: 629
- [5] Püttgen W, Hallstedt B, Bleck W *et al.* *Acta Materialia*[J], 2007, 55(3): 1033
- [6] Mohamed Ramadan, Mitsuharu Takita, Hiroyuki Nomura. *Materials Science and Engineering A*[J], 2006, 430: 285
- [7] Zhao Y Q, Wu W L, Ma X D. *Materials Science and Engineering A*[J], 2004, 373: 315
- [8] Zhao Y Q, Wu W L, Chang H. *Materials Science and Engineering A*[J], 2006, 416: 181
- [9] Zhao Yongqing(赵永庆), Zhu Kangying(朱康英), Zhao Xiangmiao(赵香苗). *China Patent*(中国专利), ZL 97112302.0[P], 1997
- [10] Zhao Yongqing(赵永庆), Zhu Kangying(朱康英), Zhao Xiangmiao(赵香苗). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 1998, 27(6): 360
- [11] Ma Fengcang. *Materials Science and Engineering A*[J], 2006, 416: 59
- [12] Chen C P, Tsao C Y A. *Acta Mater*[J], 1997, 45(5): 1955
- [13] Zhang Xiyan(张喜燕). *Titanium Alloy and Application*(钛合金及应用)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 108
- [14] Masafumi Kikuchi, Yukyo Takada. *Dental Materials*[J], 2003, 19: 375
- [15] Song Yujiu(宋余九). *The Grain Boundary and Mechanical Behavior of Materials*(金属的晶界与强度)[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1986: 11

Microstructure and Mechanical Properties of Ti14 Alloy after Semi-Solid Deformation

Chen Yongnan¹, Wei Jianfeng¹, Zhao Yongqing², Qu Kepeng¹, 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: A novel flame-retarded Ti14 alloy (α +Ti₂Cu) was solid forged at 950 °C and semi-solid forged (SSF) at 1000 °C, respectively. Compared with that of the solid forged alloy, the microstructure and tensile properties of the semi-solid forged alloy were investigated; meanwhile, the possible reason for the change of the microstructure and tensile properties were also discussed. The results show that the dynamic recrystallization does not occur during the SSF, which coarsened the grains at room temperature. Liquid Ti₂Cu distributed along grain boundaries under pressure, and segregation was formed, coarsening grain boundaries and changing their microstructure; the microstructure change of grain boundaries induced the hardening effect, resulting in the increase of tensile strength and the decrease of plasticity at room temperature.

Key words: Ti14 alloy; semi-solid deformation; microstructure; mechanical properties

Biography: Chen Yongnan, Ph. D., State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China, Tel: 0086-29-82664764, E-mail: chen Yongnan@stu.xjtu.edu.cn