

变形工艺对 Ti-3Al-5Mo-5V 动态压缩变形的影响

张振刚¹ 宋昊¹ 张艳² 吴国清¹ 黄正¹

(1 北京航空航天大学,北京 100083)

(2 北京科技大学,北京 100083)

文 摘 采用显微组织分析和工艺试验相结合的方法系统分析了变形工艺对 Ti-3Al-5Mo-5V 钛合金动态压缩变形行为的影响规律。结果表明,变形速率和变形量影响着合金动态变形局部化的程度(剪切带的宽度)和变形过程中出现的剪切带的类型,动态变形后剪切带区域的硬度与其他位置的硬度差异较大,这种差异可以通过变形后适当的后续退火处理来消除。

关键词 剪切带,热处理,动态变形,钛合金

Effects of Deformation Process on Dynamic Compressive Deformation of Ti-3Al-5Mo-5V

Zhang Zhengang¹ Song Hao¹ Zhang Yan² Wu Guoqing¹ Huang Zheng¹

(1 Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

(2 Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract By using the combination of microstructure analysis and procedure test, the effects of deformation process on dynamic compressive deformation behavior of Ti-3Al-5Mo-5V alloy are investigated systematically. The results show that deformation velocity and strain affect the degree (width of shear band) and character of the localization. The hardness of shear band is quite different from the other zone and the difference of hardness can be eliminated by proper annealing treatment.

Key words Shear band, Heat treatment, Dynamic deformation, Titanium alloy

1 前言

Ti-3Al-5Mo-5V 作为一种 $\alpha + \beta$ 两相钛合金具有比强度高、塑性好、耐蚀性好等优点^[1~5],采用冷镦的方法制作的紧固件由于具有力学性能好、精度高、表面质量好等优点在航空航天领域有广泛的用途^[1]。由于冷镦工艺参数较多,其合金显微组织特征复杂,很难确定最佳工艺参数,造成冷镦成品率不高。为了提高冷镦件的成品率必须要对冷镦工艺参数进行严格的控制^[6~7]。目前,对于两相钛合金冷镦加工在 10~500 mm/s 的变形行为研究极少^[8]。本文探讨了在上述范围内,变形工艺对 Ti-3Al-5Mo-5V 的变形行为的影响。

2 试验

2.1 材料

Ti-3Al-5Mo-5V 棒材,其化学成分见表 1。

表 1 Ti-3Al-5Mo-5V 的化学成分

Tab 1 Chemical composition of Ti-3Al-5Mo-5V
%(质量分数)

Al	Mo	V	C	Fe	Si
3.0	4.6	4.9	0.01	0.17	0.04
Zr	O	N	H	Ti	
0.30	0.14	0.011	0.01	余量	

2.2 方法

棒材在 780 °C 退火 2 h 后,以 2~4 °C/min 的速率冷却到 550 °C 后空冷(称退火试样),将棒材加工成 4 mm × 6 mm 压缩试样。动态压缩试验在 Gleeble-1500 热模拟机上进行,试样两端均用 0.13 mm 厚的石墨纸润滑。

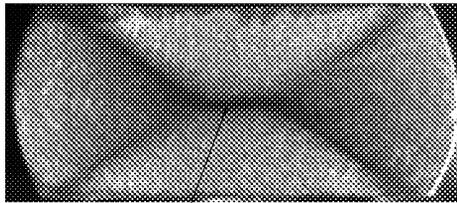
在 XJP-3C 光学显微镜和 S-530 扫描电镜上观察,采用的金相腐蚀剂为:10 mL H₂O + 3 mL HNO₃

收稿日期:2005-10-11;修回日期:2006-11-14

作者简介:张振刚,1967 年出生,副研究员,主要从事钛合金冷镦工艺方面的研究工作

+1 mL HF,采用 Sisc - las8软件进行定量测定。

变形后试样中变形剪切带宽度的测量方法为:在试样中心横向剪切带中心向两侧各延伸 250 μm 的范围内,利用读数显微镜测量沿着试样轴线方向移动,遇到的第一条变形流线到最后一条变形流线之间的距离,共测量 11个位置取平均值(图 1)。



剪切带宽度测量位置

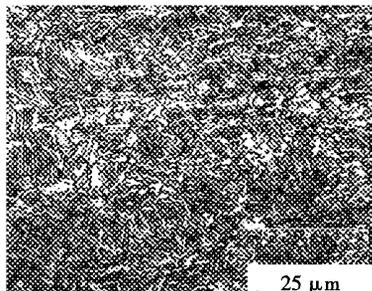
图 1 剪切带的宏观组织形貌

Fig 1 Macrostructure of shear band

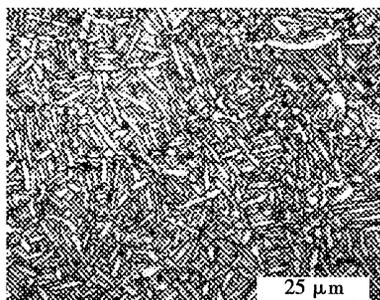
3 结果及分析

3.1 热处理对 Ti-3Al-5Mo-5V 组织的影响

图 2 为 Ti-3Al-5Mo-5V 原始组织和退火后的显微组织。其纵向剖面的原始组织为 α 相与细小片状的 β 相的混合[图 2(a)], β 相质量分数约为 33%。在保温时间相同的条件下(2 h),随着退火温度的提高,合金中的 β 片在不断增大[图 2(b)],当合金在 800 退火时其显微组织易变成粗大的魏氏组织。定量金相测定表明,退火温度和时间的变化均不会影响合金中 α 和 β 两相的含量。



(a) 原始纵向显微组织



(b) 780 退火 2 h 后纵向显微组织

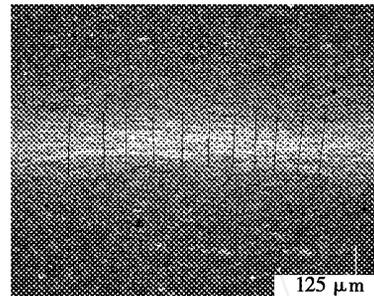
图 2 热处理对 Ti-3Al-5Mo-5V 组织的影响

Fig 2 Effects of heat treatment on microstructure of Ti-3Al-5Mo-5V

3.2 动态变形工艺对变形局部化的影响

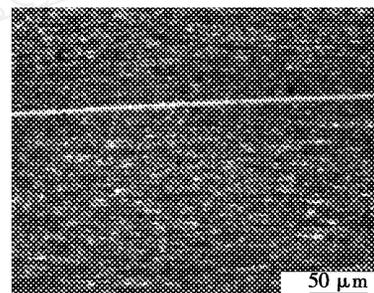
试样在自由压缩时发生变形局部化,导致试样内出现剪切带,变形过程中剪切带承受了大量的变形,剪切带内部以及剪切带的界面处都可以成为变形过程中的裂纹源^[9-10]。

动态压缩变形后 Ti-3Al-5Mo-5V 内部均形成剪切带(图 1,图 3),结果表明,对于退火试样,当变速率 $< 250 \text{ mm/s}$ 时,出现形变剪切带[图 3(a)],当变速率为 300 mm/s 时,在剪切带内部会出现白色剪切带[图 3(b)]。



(a) 形变剪切带

变形速率 100 mm/s ,变形量 66.67%。



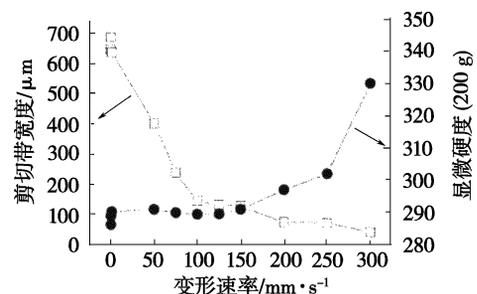
(b) 白色剪切带

变形速率 300 mm/s ,变形量 66.67%。

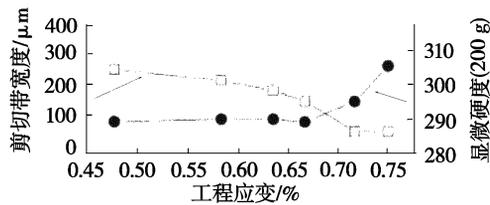
图 3 Ti-3Al-5Mo-5V 剪切带的微观形貌

Fig 3 Microstructure of shear band of Ti-3Al-5Mo-5V

剪切带是变形局部化的结果,其宽度是局部化程度的标志。剪切带越宽则变形局部化程度越小,越不容易出现裂纹。因此剪切带宽度成为影响 Ti-3Al-5Mo-5V 变形性能的关键因素。对形变剪切带的宽度测量结果[图 4(a)]表明,其宽度随着变形速率的增加而减小,即随着变形速率的增加 Ti-3Al-5Mo-5V 的变形局部化更加明显。



(a) 变形速率



(b) 工程应变

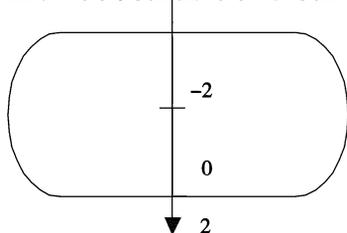
图 4 Ti-3Al-5Mo-5V 变形工艺与形变剪切带宽度以及剪切带硬度的关系

Fig 4 Relationships between hardness, width of shear band of Ti-3Al-5Mo-5V

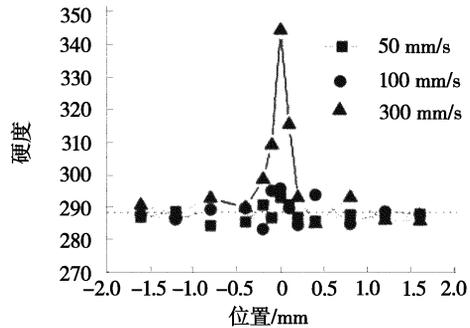
对于白色剪切带,其宽度随着变形速率的上升而增大。当变形速率达到 500 mm/s 时试样沿着剪切带方向发生剪切断裂。

在 100 mm/s 的变形速率下将退火试样压缩到不同的变形量,并对变形后的显微组织观察发现,当变形量达到 33.33% 时试样中出现了轻微的变形局部化倾向,在此之前试样变形比较均匀没有明显的剪切带出现。随着变形的进一步进行,试样内部的变形局部化现象渐渐明显,出现典型的形变剪切带并随着变形量的增加不断变窄,当变形量达到 77% 时试样发生断裂。对断裂后试样的纵剖面观察发现其剪切带中仍然没有白色剪切带的出现。在 300 mm/s 的变形速率下变形的试样,当变形量在 45% 以下时试样中剪切带为形变剪切带,但当变形量达到 50% 时出现了白色剪切带。可见剪切带的宽度和剪切带的类型同时受到变形速率和变形量的影响,变形速率或变形量的增大均会加重变形局部化倾向,并易导致白色剪切带的出现。

对不同变形速率下(变形量 66.67%)得到的退火态 Ti-3Al-5Mo-5V 的剪切带的显微硬度进行测量,结果表明,白色剪切带的硬度(变形速率为 300 mm/s)明显比形变剪切带硬度大,而且随着剪切带宽度的变小其显微硬度明显增大[图 4(a)]。剪切带的硬度是其形变硬化的反映,随着剪切带宽度的变小试样中单位区域剪切带承受的变形功增大,其硬化程度也随之增大。由于剪切带的存在,变形后试样中的硬度分布呈现出不同程度的不均匀性(图 5)。



(a) 测量位置



(b) 硬度分布

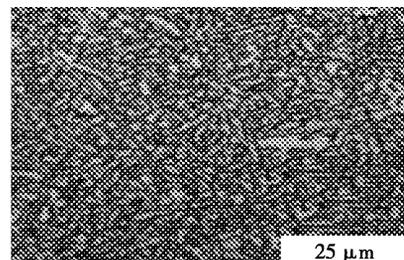
图 5 Ti-3Al-5Mo-5V 动态压缩变形后纵向剖面的显微硬度分布

Fig 5 Distribution of microhardness of Ti-3Al-5Mo-5V on longitudinal section after dynamic compressive deformation

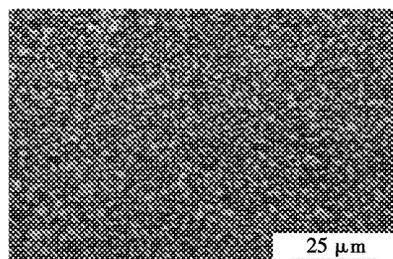
当变形速率较低时(50 mm/s, 100 mm/s)形成的剪切带为形变带,形变带区的硬度与基体几乎没有差别说明局部化程度并不大,当变形速率达到 300 mm/s 时由于形变带中部形成了白色剪切带,使得剪切带以及近剪切带区的硬度远高于其他区域。

3.3 后续热处理对变形局部化的影响

剪切带中出现硬度不均匀分布的现象会影响成品件的使用。因此必须通过后续处理的方法消除这种性能上的不均匀性。分别将经 100 mm/s(形变剪切带)和 300 mm/s(白色剪切带)变形到 66.67% 后的退火试样,在 780 重新进行 2 h 的退火,发现两个试样中的剪切带均消失,出现了近似等轴状的晶粒与相混合组织(图 6)。



(a) 形变剪切带



(b) 白色剪切带

图 6 Ti-3Al-5Mo-5V 剪切带经后续热处理后纵向剖面显微组织

Fig 6 Microstructure of shear band after annealing

白色剪切带再结晶后形成的组织较形变带更加细小,说明了白色剪切带中储存的变形能量要高于形变带。

对变形前后以及经过后续退火处理的试样进行局部硬度测试。结果表明,白色剪切带再结晶后硬度略微低于其他区域(图7),在整个纵向剖面上没有大的硬度差异出现。可见通过后续热处理的方法可以消除动态变形过程中因变形局部化造成的硬度不均匀分布的现象。

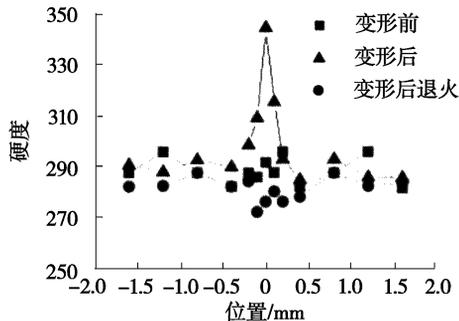


图7 Ti-3Al-5Mo-5V动态压缩变形前后及后续热处理后纵向剖面的显微硬度分布

Fig 7 Distribution of microhardness of deformed Ti-3Al-5Mo-5V on longitudinal section before and after annealing
变形速率 300mm/s,变形量 66.67%。

4 结论

(1)随着变形局部化程度的增加,Ti-3Al-5Mo-5V在动态压缩变形过程中先后出现形变剪切带和白色剪切带,剪切带宽度以及剪切带的类型(形变剪切带、白色剪切带)受到变形速率和变形量两个因素的影响,增大变形速率和增大变形量均会导致形变剪切带宽度的减小和白色剪切带的出现。

(2)动态变形后合金中形成的形变剪切带的硬

度和基体相近,而白色剪切带的硬度与基体存在很大的差异。780进行2h退火后,形变剪切带和白色剪切带区均发生再结晶,剪切带完全消除,剪切带区域与其周围区域的硬度差也随之消除。

参考文献

- 1 刘风雷.我国航空钛合金紧固件的发展.航空制造技术,2000;(6):39~41
- 2 Popov N N, Ivanov A G, Morozov S A. Effect of the deformation rate on resistance of the titanium alloy VT16 to plastic deformation. Problemy Prochnosti, 1986; (8): 45~48
- 3 Moiseev V N. High-strength titanium alloy VT16 for cold-worked fastener part production. Metallovedenie i Temicheskaya Obrabotka Metallov, 2001; (2): 28~32
- 4 Nielsen L S, Lassen S, Andersen C B et al. Development of a flexible tool system for small quantity production in cold forging. Journal of Materials Processing Technology, 1997; 71(1): 36~40
- 5 Mal'tsev, Volkova T N. Thermal stability of cold-worked titanium alloys. Metallovedenie i Temicheskaya Obrabotka, 1985; 27(1~2): 55~58
- 6 Frick D G. Alloy selection for cold forming. Advanced Materials and Processes, 2003; 161(6): 29~32
- 7 Lutsenko T I, Moltova N F. Increase in stability of tools for cold-heading. Metallovedenie i Temicheskaya Obrabotka Metallov, 1991; (8): 24~26
- 8 Johnson A J, Bull C W, Kumar K S et al. The influence of microstructure and strain rate on the compressive deformation behavior of Ti-6Al-4V. Metallurgical and Materials Transactions A, 2003; 34(2): 295~306
- 9 禹金强,周惠华,沈乐天等. Ti-55合金中的热塑剪切带.金属学报,1999; 35(4): 379
- 10 张延杰.在不同温度和高应变率下 Ti-6Al-4V合金的塑性变形和断裂特征.稀有金属快报,1999;(7): 21~22

(编辑 吴坚)