理论与试验研究

高应变速率下 TC11 钛合金动态剪切行为与性能

舒大禹^{1,2},张帷¹,胡庆华^{1,2},胡传凯^{1,2},林军^{1,2},陈强^{1,2},赵祖德^{1,2}

(1.中国兵器工业第五九研究所,重庆 400039;

2. 国防科技工业精密塑性成形技术研究应用中心,重庆 400039)

摘要:采用分离式霍普金森压杆(Hopkinson Bar)装置系统,对 TC11 钛合金进行室温高应变速率(700~2 100 s⁻¹)动态剪切试验,通过光学显微镜、显微硬度分析仪、扫描电镜研究了 TC11 钛合金动态剪切行为、绝 热剪切带微观组织与性能。结果表明:TC11 钛合金随应变速率的提高绝热剪切敏感性增加;绝热剪切带由 过渡区域的变形拉长组织和中间部位的细小晶粒组织组成,具有清晰的剪切变形流线,宽度约为 10 μm;绝 热剪切带内的显微硬度值高于基体组织,是由应变速率强化和应变强化与热软化相互作用的结果。

关键词:TC11 钛合金;绝热剪切带;微观组织

中图分类号: TG146.23 文献标识码: A

文章编号:1674-6457(2012)01-0001-04

Dynamic Shearing Behavior and Mechanical Property of TC11 Alloys at High Strain Rates

SHU Da-yu^{1,2}, ZHANG Wei¹, HU Qing-hua^{1,2}, HU Chuan-kai^{1,2}, LIN Jun^{1,2}, CHEN Qiang^{1,2}, ZHAO Zu-de^{1,2}

(1. No. 59 Institute of China Ordnance Industry, Chongqing 400039, China;

2. National Defence Research and Application Centre of Precision Plastic Forming Technology, Chongqing 400039, China)

Abstract: Dynamic shear experiment of TC11 at high strain rates (700~2 100 s⁻¹) was carried out by torsional split Hopkinson bar. The behavior of dynamic shear, microstructure and properties of TC11 alloy were investigated by optical microscope, microhardmess instrument, stereoscan electron microscope and transmission electron microscope. The results show that the sensitivity of adiabatic shear increases with increase of strain rate. Adiabatic shear band consists of elongated microstructures located in transition areas and equiaxed grains with fine grain size of intermediate position. Adiabatic shear band is about 10 μ m and characterized by shearing deformation streamline. The microhardness value of shear bands is higher than that of matrix body. This can be attributed to strain rate strengthening and interacting between strain strengthening and thermal softening.

Key words: TC11 alloy; adiabatic shear band; microstructure

钛合金是飞机和发动机的主要材料之一,其应 用水平是衡量武器装备先进性的重要标志之一。如 美国 F-119 涡轮发动机用钛量高达 35%,而我国最新的涡扇发动机设计用钛量为 25%,与国外还有较

收稿日期: 2011-10-10

基金项目:总装预研基金项目(9140A12011610BQ1901)

作者简介:舒大禹(1980-),男,四川宜宾人,工程师,主要研究方向为轻合金材料及塑性成形技术。

大差距^[1-4]。TC11 钛合金是一种马氏体 α+β 型钛 合金,在 500 ℃以下,具有优异的热强性能(如高温 强度、蠕变抗力等),并且具有较高的室温强度。目 前 TC11 在航空发动机上的使用量较大,如制造航 空发动机压气机盘、叶片、环形件和紧固件等^[5-6]。

TC11 钛合金是我国仿俄罗斯的 BT9 钛合金研制的,国外对该牌号钛合金的研究资料报导很少,国内研究主要集中在材料成分设计、热处理工艺、热锻成形制度与组织对静态力学性能的影响等方面^[7-10]。TC11 钛合金具有变形抗力大、导热性差、变形热力参数容差小的特点,加之流动应力和变形组织对变形热力参数(变形温度、应变速率等)比较敏感,在生产中容易产生各种宏观和微观缺陷,影响了航空装备的安全性与可靠性^[11-12]。

由于 TC11 钛合金在飞机和发动机的压气机 盘、紧固件等承力结构件上的大量应用,因而研究 TC11 钛合金在冲击载荷作用下的动态力学行为及 其微观组织结构特征,具有重要的工程应用价值。 文中采用分离式霍普金森压杆对 TC11 钛合金帽形 试样进行动态冲击剪切试验,通过光学显微镜、金相 显微硬度分析仪、扫描电镜等进行分析,研究了 TC11 钛合金在动态冲击变形过程中所形成绝热剪 切带的微观组织结构与性能变化。

1 试验材料及方法

试验材料为 TC11 钛合金,采用真空自耗电弧 炉多次熔炼制得 ϕ 450 mm 的大铸锭,TC11 钛合金 α+β→β 相转变温度 t_{β} 为 1 008 °C,在 2 500 t 径向 锻机上完成铸锭的低一高一低 3 火改锻,制得 ϕ 120 mm 规格的棒材,其化学成分见表 1。对改锻后的 棒材进行退火热处理,热处理工艺为 960 °C 保温 1 h 后空冷+600 °C 保温 4 h 后空冷,得到的 TC11 钛合 金显微组织如图 1 所示,主要由等轴 α 相、含针状 α 相的 β 转变组织等组成。

表 1 TC11 钛合金的化学成分(质量分数)

Та	able 1	Chemical composition of TC11 alloys						0/
A1	Mo	Zr	Si	С	Fe	Н	0	Ti

1 11	1110	21	U1	C	10		0	
6.43	3.25	1.79	0.26	0.023	0.071	0.003	0.004	余量

动态冲击剪切试验在 φ12.7 mm 分离式 Hopkinson 压杆系统上进行,实验原理及装置参见文献



图 1 TC11 钛合金退火后的显微组织 Fig. 1 Microstructure of TC11 alloys annealed

[13],动态冲击剪切试样如图 2 所示。试验条件:撞 击杆长度为 200 mm,打击气压为 0.18 MPa,平均 应变速率分别为 700,1 400,2 100 s⁻¹。将室温动态 冲击变形后的试样沿轴线切开,经研磨、机械抛光、 腐蚀后在 OLYPUS PME3 型光学显微镜下观察试 样微观形貌及特征。采用 HMV-2 型金相显微硬度 分析仪对绝热剪切带内组织、基体组织进行性能测 试。采用扫描电子显微镜对绝热剪切带的微观组织 进行分析。



Fig. 2 Sample for dynamic shearing

3 试验结果与讨论

3.1 高应变速率下的力学响应

图 3 所示的曲线表征了 TC11 钛合金材料从动态加载开始到产生绝热剪切带的承载时间,承载时间越长,表明该材料对绝热剪切越不敏感,反之则越敏感。从图 3 中的曲线可以得出,在应变速率为 700 s⁻¹时,TC11 钛合金的承载时间约为 80 μs。当 应变速率升高到 1 400 s⁻¹时,该合金的承载时间基

2

本未变化,这是由于合金由等轴 α 相、β 转变组织组 成,对孪生、位错的形成需要较高的剪切变形能;当 应变速率升高到 2 100 s⁻¹时,TC11 合金的承载时 间降到 60 us,表明应变速率升高到一定程度时, TC11 合金材料的绝热剪切敏感性随应变速率的提 高而增加。



高应变速率下 TC11 合金的应力-时间曲线 图 3 Fig. 3 Stress-time curves of TC11 titanium alloy

通过对图 3 中的曲线进一步分析还可以得出, 在剪切变形过程中钛合金组织结构大致经历了 3 个 阶段:第1阶段,流变应力随承载时间的增加而增 加,主要是由于变形初期剪切区域内晶粒在压应力 和剪切应力的共同作用下,沿着剪切方向晶粒组织 转动、变形等;第Ⅱ阶段,流变应力随着承载时间的 增加基本不发生变化,主要是由于应变、应变速率增 加导致的加工硬化效应,绝热温升而引起的热软化 效应,两者之间交互作用;第Ⅲ阶段,热软化超过了 应变硬化和应变率硬化的总和,发生了热粘塑性失 稳,并形成了绝热剪切带,导致试样的承载能力下 降,最终发生剪切破坏失效。

TC11 合金在应变速率为 2 100 s⁻¹下的应力-应变曲线和动态剪切载荷-位移曲线分别如图 4 和 图 5 所示。可以看出,在相同的试验条件下,同一组 试验的重现性非常好(每组试样共5件)。通过进一 步的分析还可以得出,最终失效应变在23%~27% 之间,其剪切破坏载荷达到 60 GPa,表明 TC11 合 金在高应变速率作用下,具有较高的应变率强化效 应。

微观组织结构分析 3.2

绝热剪切带的金相显微组织照片如图 6 所示, 绝热剪切带的扫描电镜组织照片如图 7 所示。从图



TC11 合金在应变速率为 2 100 s⁻¹下的动态剪切应 图 4 力-应变曲线





- 图 5 TC11 合金在应变速率为 2 100 s⁻¹下的动态剪切载 荷-位移曲线
- Fig. 5 Displacement-loading curves of TC11 titanium alloy at strain rate of 2 100 s^{-1}

6a 中可见,绝热剪切带沿剪切方向形成一条贯穿整 个剪切区的"白亮带"。图 6b 所示为绝热剪切带的 局部区域放大照片,可以看出,绝热剪切带中晶粒发 生严重的拉长变形,可看到清晰的剪切变形流线,呈 现出明显的方向性,剪切带与基体组织的边界不平 整,呈现一种过渡的形貌。从图7中可见,绝热剪切 带的宽度约为10 um,沿剪切方向形成流线:绝热剪 切带中部的晶粒组织十分细密,在扫描电镜下不能



绝热剪切带金相显微组织 图 6 Fig. 6 Optical micrographs of ASB

а

够分辨出来。为进一步分析绝热剪切带中部、边缘 过渡区域组织之间的差别,还需对其进行透射电镜 分析研究。



图 7 绝热剪切带的 SEM 形貌 Fig. 7 SEM images of ASB

3.3 性能分析

绝热剪切带组织与基体组织的显微硬度测试点 分布如图 8 所示,显微硬度值分布如图 9 所示。在 图 8 中所示意的每个圆圈周围测试 3 次取平均值, 代表该点的显微硬度值。从图 9 中可以得出,绝热



图 8 显微硬度测试示意 Fig. 8 Sample for microindentation hardness



图 9 显微硬度曲线 Fig. 9 Curves of microindentation hardness

剪切带内的显微硬度值高于基体约 30HV0.025。 基体本身具有很高的显微硬度,绝热剪切带内的显 微硬度仅在基体的基础上稍有提高,这是由于在高 应变速率作用下,剪切带内应变速率强化和应变强 化与热软化相互作用的结果,导致晶粒组织细化,从 而提高其硬度值。

4 结语

 TC11 钛合金随应变速率的提高绝热剪切敏 感性增加,同时应变率强化效应增强,在金相显微镜 下剪切区域呈一条白亮带。

2) TC11 钛合金绝热剪切带过渡区域发生严重的拉长变形,绝热剪切带中部的晶粒组织十分细密,可看到清晰的剪切变形流线,呈现出明显的方向性, 绝热剪切带的宽度约为 10 μm。

3) TC11 钛合金在高应变速率作用下,应变速 率强化和应变强化与热软化相互作用的结果,导致 剪切带内晶粒组织细化,绝热剪切带内的显微硬度 值比基体高 30HV0.025 左右。

参考文献:

- [1] BERDIN V K, KARAVAEVA M V, SYUTINA L A. Mechanical Behavior and Evolution of the Lamellar Microstructure of Alloy VT9 [J]. Metal Science and Heat Treatment,2004,46(1/2):54-60.
- [2] SESHACHARYULU T, MEDEIROS S C, MORGAN J T. Hot Deformation Mechanism in ELI Grand Ti-6A1-4V [J]. Scripta Materialia, 1999, 41(3): 283-288.
- [3] TENG X, WIERZBICKI T, COUQUE H. On the Transition from Adiabatic Shear Banding to Fracture
 [J]. Mechanics of Materials, 2007, 39:107-112.
- [4] MURR L E, RAMIREZ A C, GAYTAN S M, et al. Microstructure Evolution Associated with Adiabatic Shear Bands and Shear Band Failure in Ballistic Plug Formation in Ti-6Al-4V Targets[J]. Materials Science and Engineering A,2009,516:205-211.
- [5] LEE Woei-Shyan, LIU Chen-yang, CHEN Tao-Hsing. Adiabatic Shearing Behavior of Different Steels under Extreme High Shear Loading [J]. Journal of Nuclear Materials, 2008, 374:313-320.

(下转第 39 页)

径平均缩小 2.2 μm。

4 结语

约轧温度为 850 ℃左右时,以 0.5~2.0 ℃/s
 的速度冷却至 650 ℃,得到的 20MnSi 热轧成品棒
 材组织晶粒更细小、力学性能更高。

2)和常规轧制相比,对 20MnSi 热轧棒材参数 进行控制,抗拉强度提高 60 MPa,晶粒直径平均缩 小 2.2 μm。结果表明,在变形工艺、合金成分一定 的条件下,加快钢材的冷却速度,降低终轧温度可达 到细化晶粒,提高力学性能的目的。

参考文献:

- [1] 王占学.控制轧制与控制冷却[M].北京:冶金工业出版社,1988:1-10.
- [2] 李胜利,王国栋.大断面轴承钢控轧控冷工艺的模拟与 分析[C].2005 中国钢铁年会论文集(第4卷),2005.
- [3] 王有铭,李曼云,韦光.控制轧制与控制冷却[M],北 京:冶金工业出版社,2009:1-8.

(上接第4页)

- [6] CHIOU S T, TSAI H L, LEE W S. Effects of Strain Rate and Temperature on the Deformation and Fracture Behaviour of Titanium Alloy [J]. Materials Transactions, 2007,48(9):2525-2532.
- [7] 陈慧琴,郭灵,曹春晓. TC11 钛合金片层组织热变形
 行为及组织演变[J]. 航空材料学报,2008,28(1):18
 -22.
- [8] MARTINEZ F, MURR L E, RAMIREZ A, et al. Dynamic Deformation and Adiabatic Shear Microstructures Associated with Ballistic Plug Formation and Fracture in Ti-6Al-4V Targets[J]. Materials Science and Engineering A,2007,454(455):581-586.
- [9] LIU Wei, ZHANG Zhu, HUI Song-xiao. Study on Mar-contain Properties of TB10 Alloy [J]. Rare Metal

(上接第8页)

参考文献:

- [1] E Da-xin, CHEN Ming-feng. Numerical Solution of Thinwalled Tube Bending Springback with Exponential Hardening Law[J]. Steel Research Int, 2010, 81 (4): 286 – 291.
- [2] E Da-xin, HE Hua-hui, LIU Xiao-yi, et al. Experimental Study and Finite Element Analysis of Spring-back Deformation in Tube Bending [J]. International Journal of Mineral, Metallurgy and Materials, 2009, 16(2): 177-183.
- [3] LI Cheng, YANG He, ZHAN Mei. Effects of Process Parameters on Numerical Control Bending Process for Large Diameter Thin-walled Aluminum Alloy Tubes

Materials and Engineering, 2005, 34:383-388.

- [10] ANDRADE U, MEYERS M A. Dynamic Recrystallization in Highstrain, High-strain-rate Plastic Deformation of Copper[J]. ActaMater, 1994, 42(8): 3183-3194.
- [11] 曾卫东,周义刚. 冷速对 TC11 合金β加工显微组织和 力学性能的影响[J].金属学报,2002,38(12):1273-1276.
- [12] MEYERS M A, PAK H R. Observation of an Adiabatic Shear Band in Titanium by High-voltage Transmission Electron Microscopy[J]. Acta Metallurgica, 1986,34(12): 2493-3502.
- [13] 胡时胜,邓德涛,任小彬. 材料冲击拉伸实验的若干问 题探讨[J]. 实验力学,1998(1):9-14.

[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2009, 19(3):668-673.

- [4] LI H, YANG H, ZHAN M, et al. Kou Deformation Behaviors of Thin-walled Tube in Rotary Draw Bending under Push Assistant Loading Conditions [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210 (1):143-158.
- [5] 鄂大辛,宁汝新,唐承统,等.弯管壁厚减薄与材料特性
 关系的试验研究[J].材料科学与工艺,2008,16(2):
 200-203.
- [6] 张敬文,鄂大辛,李延民,等.管材弯曲中起皱行为的试验及有限元模拟分析[J].汽车工艺与材料,2011(5):6-9.