

锻造工艺对 Ti40 阻燃钛合金微观组织与力学性能的影响

曹京霞¹, 王 宝¹, 黄 旭¹, 孙欢迎¹, 赖运金², 杨 晋³

(1. 北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 西部超导材料科技有限责任公司, 西安 710018;
3. 贵州安大航空锻造有限责任公司, 安顺 561005)

摘 要: 采用 3 种工艺锻造出 Ti40 阻燃钛合金 90 mm 方棒, 对棒材的微观组织及力学性能进行研究, 结果表明: 减少锻造火次、增加单火的变形量可以有效细化 Ti40 合金棒材的晶粒尺寸、提高组织均匀性, 即使原始组织晶粒度不够均匀, 也能够得到有效的改善。采用多火次小变形量锻造易造成 Ti40 合金棒材微观组织粗化和不均匀。Ti40 合金棒材的拉伸强度和塑性对 β 晶粒尺寸变化不敏感, 蠕变性能随晶粒尺寸增大略有提高, 用于锻件成形的 Ti40 合金坯料应该进行充分锻造, 以避免因小变形量校正变形产生粗大和不均匀的组织。

关键词: 阻燃钛合金; β 钛合金; 锻造工艺; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

Effect of forging process on microstructures and mechanical properties of Ti40 burn resistant titanium alloy

CAO Jing-xia¹, WANG Bao¹, HUANG Xu¹, SUN Huan-ying¹, LAI Yun-jin², YANG Jin³

(1. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;
2. Western Superconducting Technologies Co., Ltd., Xi'an 710018, China;
3. Anda Forging Plant of GAIC, Anshun 561005, China)

Abstract: 90 mm tetragonal bars were made by forging Ti40 burn resistant titanium alloy through three different forging processes. The microstructures and mechanical properties of these forged bars were studied. The results show that it is an effective way to uniform and refine the beta grain size of Ti40 alloy bars through large deformation processing, even if the primary microstructures are not uniform. Multiple forging with small deformation can easily make the beta grain size of Ti40 alloy bars coarser and nonuniform. Tensile properties of Ti40 alloy bars are not very sensitive to the beta grain size. Creep properties slightly improve with the increase of beta grain size. To avoid coarse and nonuniform microstructures, forging blanks should be well performed before the final forging due to the small deformation modification.

Key words: burn resistant titanium alloy; β titanium alloy; forging process; microstructure; mechanical property

航空发动机性能的提高与轻质、耐高温钛合金材料的使用密不可分, 钛合金用量成为衡量航空发动机先进程度的重要标志。随着用钛量增加而引发的“钛火”问题又在很大程度上制约了钛合金在航空发动机的应用。阻燃钛合金是为应对航空发动机“钛火”隐患而研制的专用钛合金^[1], 美国的 F119 发动机在压气

机内环和静子叶片等部位使用了 Ti-35V-15Cr 阻燃钛合金(称为 Alloy C 合金), 作为预防“钛火”的手段之一。Ti40 合金是西北有色金属研究院研发的阻燃钛合金, 其名义成分为 Ti-25V-15Cr-0.2Si, 长期使用温度为 500 °C。有关 Ti40 合金热处理工艺、组织性能关系方面的研究已有大量报道^[2-8], 对于 Ti40 合金热加

基金项目: 航空科学基金资助项目(20123021004)

收稿日期: 2013-07-28; 修订日期: 2013-10-10

通信作者: 曹京霞, 高级工程师, 硕士; 电话: 010-62496624; E-mail: caojingxia@sina.com

工工艺的报道很少,大多是关于变形本构关系及热加工图方面^[9-12]的研究,很少涉及实际的锻造工艺研究。从热模拟试验的结果看,铸态^[10]和锻态^[11-12]的Ti40合金的变形抗力均很高,相近条件下是普通钛合金如Ti-6Al-4V、Ti-6Al-4V (ELI)合金^[13-14]的5~7倍,锻造难度大,在锻件成形时往往会遇到在设计的最终火次锻压不到位,或制备的环锻件圆整度不好等问题,需要补充锻造进行小变形校正,多火次小变形锻造对Ti40合金组织性能的影响需要进一步研究。本文作者研究多火次小变形量锻造对Ti40合金棒材组织和性能的影响。

1 试验

本研究所用的Ti40阻燃钛合金为同炉批的3根 d 300 mm棒料制备环锻件时获得的冲孔芯料。3根原始棒料的编号分别为S1、S2和S3。Ti40合金 d 300 mm棒料分别经一火镦粗变形后进行冲孔,得到3个冲孔芯料,冲孔芯料直径均为180 mm,利用这3个冲孔芯料进行锻造工艺试验。其中,S1芯料经两火拔长变形由 d 180 mm制成90 mm方棒(No.1);S2芯料经3火拔长变形制成90 mm方棒(No.2);S3芯料经4火拔长变形制成90 mm方棒(No.3),具体锻造工艺见表1。方棒锻造在1250水压机上完成,锻造各火次坯料的加热温度均为1050℃。

从90 mm方棒上沿拔长方向取试样毛坯,毛坯经850℃、1 h (WQ)+550℃、5 h (AC)热处理后加工成拉伸和蠕变试样。测试室温、高温拉伸,热稳定及高温蠕变性能。对每种变形条件下试样的微观组织利用金相显微镜进行了观察。

表1 Ti40合金90 mm方棒的锻造工艺

Table 1 Forging processes of 90 mm tetragonal Ti40 alloy bars

No.	Forging process
1	d 180 mm→ d 140 mm→ d 90 mm
2	d 180 mm→ d 140 mm→ d 120 mm→ d 90 mm
3	d 180 mm→ d 140 mm→ d 120 mm→ d 105 mm→ d 90 mm

2 试验结果

表2分别给出了3种工艺获得的Ti40合金90 mm

表2 90 mm Ti40合金棒材的室温拉伸性能

Table 2 Room temperature tensile properties of 90 mm Ti40 alloy bars

No.	Condition	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	ψ /%
1	Without thermal exposure	1 020	1 005	19.8	37.5
2		1 020	1 003	19.3	35.5
3		1 010	1 000	17.8	34.2
1	500℃, 100 h exposure	—	—	8.0	19.0
2		—	—	10.3	20.0
3		—	—	8.3	17.8

方棒的室温拉伸、热稳定性能。可以看到:3种工艺获得的棒材室温拉伸性能没有明显差异,拉伸强度和伸长率均比较接近。热稳定性能由试样经500℃、100 h热暴露后测试的室温拉伸塑性来表征,与未经热暴露的试样相比,试样热暴露后室温拉伸的伸长率和面缩率降低了50%左右,但3种工艺热稳定性差别很小。

表3所列为Ti40合金90 mm方棒的540℃拉伸性能和500℃、250 MPa、100 h条件下的蠕变性能。与室温下相近,3种工艺的高温拉伸强度和塑性相差不大,组织略粗的棒料的蠕变性能更好一些。

表3 90 mm Ti40合金棒材的高温性能

Table 3 High temperature properties of 90 mm Ti40 alloy bars

No.	540℃			500℃	
	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	ψ /%	ϵ_p /%
1	840	693	17.5	57.5	0.032
2	835	693	23.8	57.0	0.027
3	820	728	17.8	53.3	0.019

3 分析讨论

3.1 锻造工艺与组织特征

本研究所用的Ti40合金 d 300 mm棒料端面低倍组织见图1,组织均匀性及晶粒尺寸差异较大。从 d 300 mm棒料到冲孔芯料仅经历了一火镦粗和冲孔变形,可以推断出相同工艺获得的3个冲孔芯料中S1的冲孔芯料组织最粗、并且最不均匀;S3的冲孔芯料组织最细、最均匀;S2的组织应介于前两者之间。

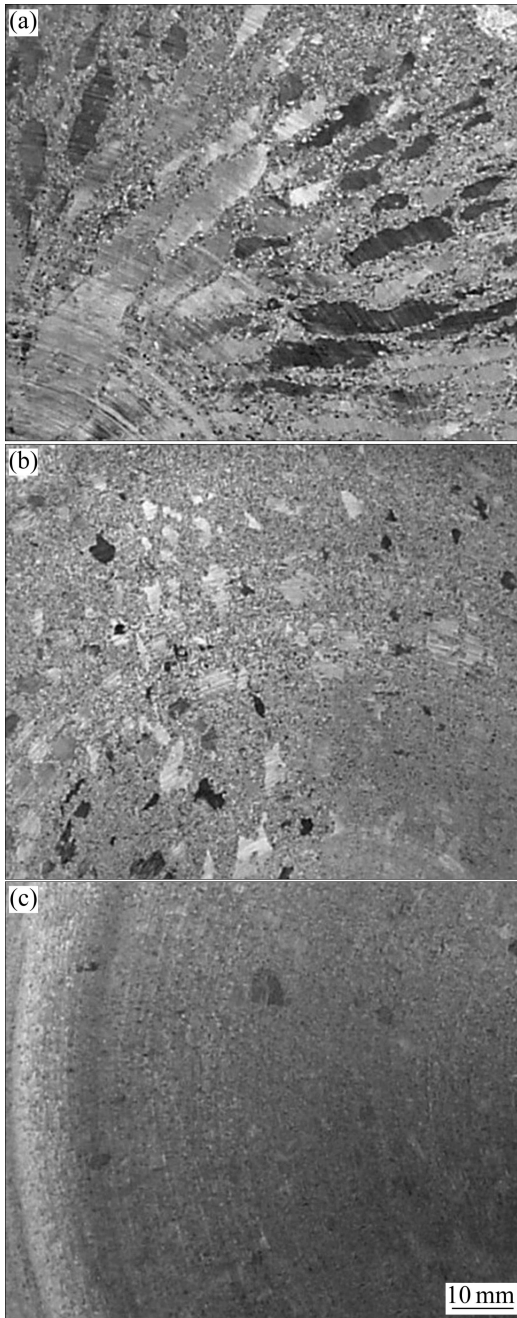


图 1 原始 Ti40 合金棒材的低倍组织
Fig. 1 Macrostructures of primary Ti40 alloy bars: (a) S1; (b) S2; (c) S3

3 块冲孔芯料首先经一火拔长变形锻成 140 mm 的方棒, 然后分别采用不同的变形量分配方案进行 90 mm 方棒的锻造。图 2 所示为 Ti40 合金冲孔芯料经过不同火次拔长变形后获得的 90 mm 方棒的微观组织。S1 的冲孔芯料锻成 140 mm 方棒后, 再经一火大变形量拔长锻造获得的 90 mm 方棒(1 号), 该火变形量达到 58%, 棒材的微观组织最均匀, 并且 β 晶粒较细; S3 的冲孔芯料锻成的 140 mm 方棒再经过 3 火小变形

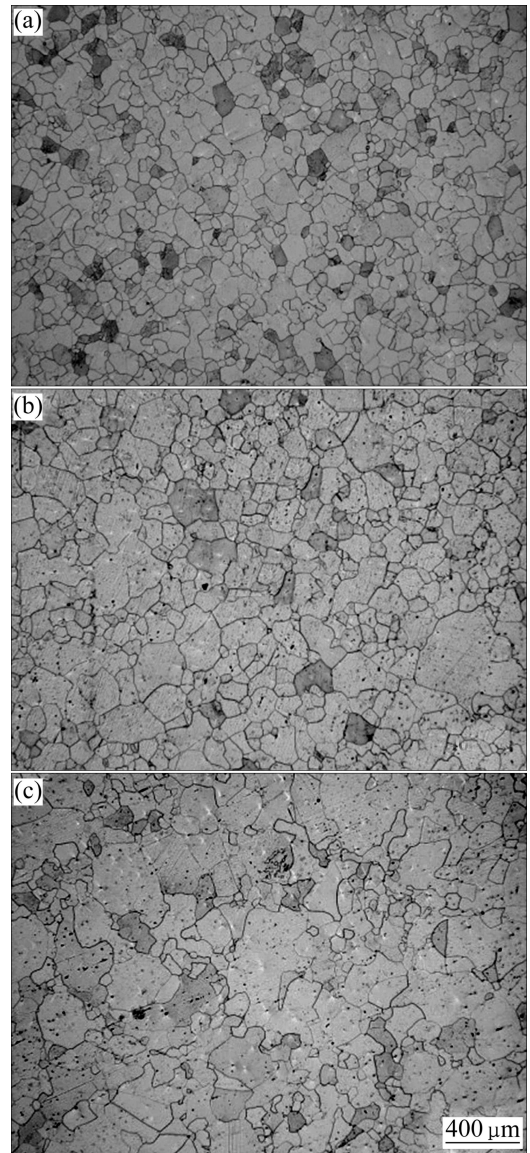


图 2 Ti40 合金 90 mm 方棒的微观组织
Fig. 2 Microstructures of Ti40 alloy 90 mm tetragonal bars: (a) No.1; (b) No.2; (c) No.3

量(23%~26%)拔长锻造获得的 90 mm 方棒(3 号), 其微观组织均匀程度和细化程度不如 1 号棒料; S2 的冲孔芯料拔长锻造火次介于上述两者之间, 得到的 2 号棒料的组织介于上述两者之间, 局部可见比较大的 β 晶粒。

对比图 2 和 1 可以看出: 单火大变形量锻造对细化 β 晶粒尺寸、提高组织均匀性非常有效, 即使原始组织晶粒度不够均匀, 也能够很好地得到改善, 见图 2(a); 而多次小变形量锻造获得的棒材组织均匀性要差一些, 由于坯料高温加热次数增加, 晶粒有所长大, 仅在晶界处有比较明显的再结晶小晶粒(图 2(c)), 这种组织是在原始坯料组织比较好的情况下获得

的,如果原始坯料的组织均匀性不好,或有比较多的粗晶,小变形多火次锻造则会造成更为严重的组织不均匀性,反映到大锻件就有可能造成比较严重的组织的不均匀,因为大锻件坯料的加热时间长, β 晶粒长大更为显著。在实际生产中,由于Ti40合金变形抗力较高,生产锻件时难免遇到锻压或轧制不到位,需要小变形修复,或者生产变截面的模锻件时,锻件各部位变形量有比较大的差异,那么必须保证原始坯料的组织均匀、晶粒较细,因此制坯过程对组织的控制非常重要。

3.2 微观组织和力学性能

Ti40阻燃钛合金为稳定 β 型钛合金,其微观组织是以单相 β 晶粒为基体,在晶内和晶界有点状弥散分布的第二相,这些第二相为硅化物相和少量的 α 相, α 相是合金中杂质元素氧所带来的。锻造工艺对Ti40合金微观组织的影响主要体现在对 β 晶粒尺寸的影响,没有更多的细节组织的变化,这种组织不同于 $(\alpha+\beta)$ 型两相钛合金或近 β 型钛合金。因此反映到力学性能上,在 β 晶粒尺寸较为接近或是在一定的范围时,力学性能的差异是比较小的,即使采用不同工艺进行热处理,通常Ti40合金的室温、高温拉伸性能差异都比较小^[2]。热稳定性能的变化与第二相的析出,特别是沿晶连续 α 相的析出有关,不同的热处理工艺会对应差异较大的热稳定性能^[3,4,6]。在本研究中,采用的锻造温度、热处理工艺均相同,不会造成明显的第二相析出的差异,因此,3种工艺的棒材热稳定性能也是接近的。蠕变性能因晶粒尺寸不同呈现出微弱的差异,组织最细的1号棒料的高温蠕变的残余伸长率最大,组织最粗的3号棒料的高温蠕变的残余伸长率最低,反映出晶界滑动对蠕变性能有较大影响。

4 结论

- 1) 单火大变形量锻造对细化Ti40合金棒材的 β 晶粒尺寸、提高组织均匀性作用明显,即使原始组织晶粒度不够均匀,也能够比较有效地改善。
- 2) 采用多火次小变形量锻造易造成Ti40合金棒材微观组织粗化和不均匀。
- 3) Ti40合金棒材的拉伸强度、塑性对 β 晶粒尺寸变化不敏感,蠕变性能会随晶粒尺寸增大略提高。
- 4) 用于锻件成形的Ti40合金坯料应该进行充分的锻造,以避免由于需要小变形量校正变形而引起的组织粗大、不均匀。

REFERENCES

- [1] 雷力明,黄旭,王宝,赵红霞,曹春晓. 阻燃钛合金的研究和进展[J]. 材料导报, 2003, 17(5): 21-23.
LEI Li-ming, HUANG Xu, WANG Bao, ZHAO Hong-xia, CAO Chun-xiao. Research and development of non-burning titanium alloys [J]. Materials Review, 2003, 17(5): 21-23.
- [2] 辛社伟,赵永庆,曾卫东. Ti40 阻燃钛合金热处理的研究[J]. 金属热处理, 2008, 33(5): 68-71.
XIN She-wei, ZHAO Yong-qing, ZENG Wei-dong. Heat treatment of Ti40 burn resistant titanium alloy [J]. Metal Heat Treatment, 2008, 33(5): 68-71.
- [3] 赵永庆,辛社伟,吴欢,杨海瑛,李倩. 热处理对Ti40阻燃钛合金热稳定性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(4): 660-664.
ZHAO Yong-qing, XIN She-wei, WU Huan, YANG Hai-ying, LI Qian. Effect of heat treatment on thermal stability of Ti40 alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(4): 660-664.
- [4] 辛社伟,赵永庆,李倩,吴欢,杨海瑛. 典型热处理工艺对Ti40合金蠕变性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): s654-s658.
XIN She-wei, ZHAO Yong-qing, LI Qian, WU Huan, YANG Hai-ying. Effects of typical heat treatments on creep properties of Ti40 alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): s654-s658.
- [5] 黄旭,雷力明,王宝,赵红霞,曹春晓. Ti40合金热稳定性的研究[J]. 稀有金属, 2004, 28(1): 44-46.
HUANG Xu, LEI Li-ming, WANG Bao, ZHAO Hong-xia, CAO Chun-xiao. Thermal stability of Ti40 alloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2004, 28(1): 44-46.
- [6] 王敏敏,赵永庆,周廉. Ti40阻燃钛合金的高温蠕变行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(2): 117-120.
WANG Min-min, ZHAO Yong-qing, ZHOU Lian. High temperature creep behavior of Ti40 alloys [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2003, 32(2): 117-120.
- [7] 辛社伟,赵永庆,曾卫东,吴欢. Ti40合金550℃热暴露组织和性能演化规律的分析与讨论[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(3): 423-427.
XIN She-wei, ZHAO Yong-qing, ZENG Wei-dong, WU Huan. Analysis and discussion of mechanical properties and microstructure development for Ti40 alloy thermal exposed at 550 °C [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(3): 423-427.
- [8] 王旭,曹京霞,王宝,孙欢迎,黄旭. 二次时效处理对Ti40合金力学性能的影响[J]. 航空材料学报, 2011, 31(S1): 94-97.

- WANG Xu, CAO Jing-xia, WANG Bao, SUN Huan-ying, HUANG Xu. Effect of secondary aging on mechanical properties of Ti40 alloy [J]. *Journal of Aeroautical Materials*, 2011, 31(S1): 94-97.
- [9] SHU Ying, ZENG Wei-dong, ZHANG Xue-ming, ZHAO Yong-qing, ZHOU Yi-gang, ZHOU Lian. Fracture predicting of Ti40 burn resistant titanium alloy in hot forming [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2006, 35(12): 1900-1903.
- [10] 李 鑫, 鲁世强, 王克鲁, 曹京霞, 黄 旭. 铸态 Ti40 阻燃钛合金高温变形特性[J]. *材料热处理学报*, 2012, 33(8): 28-32.
- LI Xin, LU Shi-qiang, WANG Ke-lu, CAO Jing-xia, HUANG Xu. High temperature deformation characteristic of as-cast Ti40 burn-resistant titanium alloy [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2012, 33(8): 28-32.
- [11] 胡 萌, 鲁世强, 李 鑫, 黄 旭, 曹京霞. Ti40 阻燃钛合金高温变形本构关系研究[J]. *锻压技术*, 2011, 36(2): 119-123.
- HU Meng, LU Shi-qiang, LI Xin, HUANG Xu, CAO Jing-xia. Study on constitutive relationship of Ti40 burn-resistant titanium alloy during high temperature deformation [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2011, 36(2): 119-123.
- [12] 李劲波, 鲁世强, 李 鑫, 黄 旭, 曹京霞. 变态 Ti40 合金高温变形行为[J]. *塑性工程学报*, 2012, 19(2): 81-86.
- LI Jing-bo, LU Shi-qiang, LI Xin, HUANG Xu, CAO Jing-xia. Study on high temperature deformation behavior of wrought Ti40 alloy [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2012, 19(2): 81-86.
- [13] SESHACHARYULU T, MEDEIROS S C, FRAZIER W G, PRASAD Y V R K. Microstructural mechanisms during hot working of commercial grade Ti-6Al-4V with lamellar starting structure [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2002, 325: 112-125.
- [14] SESHACHARYULU T, MEDEIROS S C, MORGAN J T, MALAS J C, FRAZIER W G. Hot deformation and microstructural damage mechanisms in extra- low interstitial (ELI) grade Ti-6Al-4V [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2002, 79: 289-299.

(编辑 陈爱华)