

典型热处理工艺对 Ti40 合金力学性能匹配关系的影响

赵永庆¹, 辛社伟^{1,2}, 吴 欢¹, 杨海璞¹, 李 倩¹

(1. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

(2. 西北工业大学, 陕西 西安 710012)

摘 要: 研究了 2 种典型的热处理工艺 (1#, 600 °C, 4 h AC; 2#, 850 °C, 1 h WQ + 550 °C, 6 h AC) 条件下 Ti40 合金的组织、室温拉伸性能、热稳定性和蠕变性能。结果表明, 2 种工艺热处理后微观组织的差异主要在于晶界的影响, 1# 工艺热处理后合金保留锻造后的弯曲晶界, 2# 工艺热处理后微观组织的晶界清晰平直。对力学性能的测试结果表明, 2 种组织对室温拉伸性能影响不大。相对于平直晶界, 弯曲晶界有较好的热稳定性和较低温度的蠕变性能, 而平直晶界高温蠕变性能好。

关键词: Ti40 合金; 热处理; 热稳定性; 蠕变

中图法分类号: TG 146.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)05-0779-05

Ti40(Ti-25V-15Cr-0.2Si)合金是我国研制的具有中国特色的阻燃钛合金,该合金具有良好的阻燃性能和机械性能,具有很好的发展前景。在基础研究中,所在课题组已对合金的变形机理^[1,2]、阻燃机理^[3-5]、高温氧化机理^[6,7]、组织与性能的关系^[8,9]、以及热稳定性^[10,11]和蠕变性能^[12,13]进行了深入、系统的研究。在对热稳定性的研究过程中,文献[14]指出,调整目前合金的热处理工艺是提高热稳定性的一个有效方法,并提出了中低温退火工艺,比如经过 600 °C, 4 h 的热处理工艺后合金比目前使用的热处理(850 °C, 1 h WQ+550 °C, 6 h AC)具有更好的热稳定性。然而,众所周知,一个合理热处理工艺的推出,考虑的是其对综合力学性能的影响,对于 Ti40 合金,由于其要求使用到高温,所以对热稳定性和蠕变性能的影响尤为重要,为此,本工作研究合金在 2 种典型热处理工艺下的相关力学性能,对比分析典型热处理工艺对合金相关力学性能的影响,这不但能更好的理解 Ti40 合金的基础理论,而且也可以为其他相似合金的热处理研究提供参考。

1 实 验

实验材料来自西北有色金属研究院采用 500 kg Ti40 (Ti-25V-15Cr-0.2Si) 合金铸锭,通过特殊锻造方法制备的环材。合金经线切割切成尺寸 12 mm×12

mm×70 mm 的拉伸试样和 12 mm×12 mm×120 mm 的蠕变试样,对试样进行不同规范的热处理。热处理工艺为前期研究得出的典型热处理工艺: 1#, 600 °C, 4 h AC; 2#, 850 °C, 1 h WQ + 550 °C, 6 h AC (2#热处理工艺为目前合金使用的热处理工艺), 然后进行蠕变和毛坯热暴露实验。在 500 和 550 °C 热暴露 100 h 后,加工成 $\Phi 5$ mm 的标准拉伸试样进行室温力学性能的测试;蠕变试样热处理后加工成 $\Phi 5$ mm 的标准蠕变试样,蠕变温度分别为 520、535 和 550 °C,蠕变应力为 250 MPa。拉伸试验在 Instron-1185 拉伸机上进行,蠕变试验是在 RD₂ 型蠕变试验机上进行;金相 (OM) 试验是在 OLMPUS PMG 光学显微镜上进行的,金相腐蚀剂为 10%HF+ 30%HNO₃ + 50%H₂O。

2 结果及分析

2.1 力学性能

表 1 和表 2 为合金在 2 种不同热处理工艺下室温力学性能、热稳定性和蠕变性能。

从表 1 的锻态(F)和热处理态(HT)的力学性能可以看出, 2 种热处理工艺对合金都有一定的强化作用,但强化效果相差不大。相对于 1#的退火工艺, 2#热处理工艺在钛合金中属于强化热处理,经过 2#热处理工艺后,合金除了塑性略有增加外,并没有表现出强化

收稿日期: 2008-05-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”)项目(2007CB613807)

作者简介: 赵永庆,男,1966 年生,博士,教授,博士生导师,西北有色金属研究院,陕西 西安 710016,电话: 029-8831078, E-mail: nwpu_xsw@126.com

效果,这主要与 Ti40 合金的成分特点有关。对比 2 种热处理的热稳定性能,发现,1#热处理后合金具有更好的热稳定性能,特别是当热暴露温度为 550 ℃时,2#热处理对应的试样延伸率仅为 1.5%,合金明显显示脆性。而 1#热处理对应试样仍然保持一定的塑性,基本能满足使用要求。对比表 2 中的蠕变性能,发现 2 种热处理工艺适用于不同的温度范围,在 535 ℃以下,1#热处理工艺对应较好的蠕变性能,在 535 ℃以上,2#热处理工艺对应较好的蠕变性能,在 535 ℃时蠕变性能相当。这预示着,经 1#热处理工艺后的合金组织形态适用于较低温度蠕变,而 2#热处理工艺适用于较高温度的蠕变,也暗示在 535 ℃上下合金受不同的蠕变机制控制。

表 1 2 种热处理工艺下 Ti40 合金力学性能和热稳定性能
Table 1 The mechanical properties and thermal stability of Ti40 alloy after different heat treatment

Conditions	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ /%	ψ /%
F	950	935	18.0	54.0
1# HT	975	950	19.0	35.0
2# HT	970	940	23.5	42.0
1#+500 ℃, 100 h	995	960	9.5	16.5
2#+500 ℃, 100 h	1053	1025	5.5	9.0
1#+550 ℃, 100 h	990	960	4.0	8.5
2#+550 ℃, 100 h	755	-	1.5	2.0

Note: (1) F stands for as-forged condition, HT stands for as-heat treated condition, (2) the properties are without oxidation scale, (3) 1#: 600 ℃, 4 h AC; (4) 2#: 850 ℃, 1 h WQ+550 ℃, 6 h AC

表 2 2 种热处理工艺下 Ti40 合金蠕变性能

Table 2 Creep properties of Ti40 alloy after different heat treatment

HT	Condition	t /h	ε_t /%	ε_r /%
1#	520 ℃, 250 MPa	295	1.506	1.242
2#	520 ℃, 250 MPa	258	1.741	1.471
1#	535 ℃, 250 MPa	100	7.128	6.802
2#	535 ℃, 250 MPa	98	5.485	5.138
1#	550 ℃, 250 MPa	72.5	17.976	-
2#	550 ℃, 250 MPa	100	18.153	17.746

Note: HT stands for as-heat treated condition; t is sustained time of creep experiment; ε_t is total strain; ε_r is residual strain

2.2 微观组织

图 1 为合金在锻态、1#热处理和 2#热处理工艺下的 OM 组织。从组织对比可以看出,经 1#热处理后的组织(图 1b)和锻态组织(图 1a)相差不大,合金仍

然保留锻态的粗大等轴 β 晶粒和弯曲的晶界形貌,表明 600 ℃, 4 h 的退火处理仅是对合金锻态内应力和部分缺陷的回复,并没有使合金晶界形貌发生改变。相对比锻态和 1#热处理工艺组织,经 2#热处理工艺后,虽然晶粒尺寸没有变化,但是晶界形貌得到明显改变,由原来的弯曲不平变为清晰平直, β 晶粒等轴程度更好。造成 2#热处理工艺这种等轴程度更好的 β 晶粒和清晰平直晶界原因有 2 种可能方式:1 种是在热处理过程中发生再结晶,即图 2c 中的等轴 β 晶粒是热处理过程中形核长大的新晶粒;第 2 种方式是通过扩散使晶界得到较高度度的回复;显然,方式 1 在 Ti40 合金中不可能发生,作者也在多篇文章中指出过^[15,16]。在 Ti40 合金较大尺寸工件的锻造过程初期和中期,由于变形量大,变形温度高,合金已经发生动态再结晶,而到了锻造终期的道次变形过程中,由于变形量很小,基本对前面生成的再结晶组织没有影响,反而是在回炉加热过程中导致了再结晶组织的长大,合金内基本不存在应变能,再结晶不能发生。所以 2#热处理工艺的等轴组织形成主要是通过扩散方式进行的。

图 2 为合金在不同固溶温度下的组织形貌。可见,不同固溶温度下组织形貌的变化验证了上述的分析。从组织对比中可以清楚的看到晶界变化的进行过程,其变化可以用图 3 的示意图来表示,图中曲线“Ⅰ”可以表示锻态时弯曲的晶界形貌;曲线“Ⅱ”表示中间形态;曲线“Ⅲ”表示最终形成的平直晶界。显然,当合金拥有清晰平直的晶界时合金组织更稳定,系统拥有最低吉布斯自有能,而锻态时这种系统能量最高。从锻态的高能态过渡到平直晶界的低能态,晶界原子需要克服一个能垒,这个能垒是最后锻造过程中合金的系统内能和晶格对空位和原子迁移的扩散阻力,也可以认为原子从弯曲晶界位置(图 3a、3b 处)过渡到平直晶界的位置(图 3a'、3b'处)是一个热激活过程,原子虽然有扩散的趋势,但需要一个激活能。从图 1b 的组织形态可以推测,600 ℃, 4 h 的退火处理,并不能提供足够的能量使原子跨过这个能垒,所以仍然保持原有锻态的弯曲晶界。从图 2 的组织演变图可以认为使合金原子完全克服能垒需要的温度在 800 到 820 ℃之间,即当退火温度超过 800 ℃时合金完成晶界的平直化过程,这就是为什么 2#热处理工艺组织拥有等轴程度更好的 β 晶粒和清晰平直晶界的原因。

3 讨论

3.1 热处理强化

一般热处理对合金的强化主要通过 3 个方式进行,其一是通过淬火后形成马氏体或类马氏体的强化

组织进行强化(如钢);其二是通过时效后产生大量弥散分布的沉淀相强化,如铝合金;其三是使合金发生静态再结晶,一定程度细化组织,提高合金综合性能。钛合金热处理的3种强化方式都存在可能^[17]。但在 Ti40 合金热处理后的冷却过程中,保留高温的等轴全 β 相,没有发生相变,强化方式已不起作用。从热处理后金相组织可知,该合金在时效后也仅产生极少量析出物,组织仍为全 β 相,证明强化方式二也几乎不起作用。对于强化方式三,已经进行了分析,合金在锻态下就是等轴的粗大晶粒,随后的热处理只是通过扩散和晶界迁移使晶界平直的过程,没有发生静态再结晶,所以强化方式三也不起作用。造成 Ti40 合金这一现象主要与2个因素有关,第一,极高的 Mo 当量,近 β 和 β 钛合金的强化主要依靠时效过程中过饱和 β

相的分解,析出沉淀相进行强化,但对于 Ti40 合金,极高的 Mo 当量使合金固溶淬火后的 β 相依然保持稳定,根本不能发生强化方式一的相变。并且,时效时仅析出极少量的硅化物和 α 相,沉淀强化表现不明显;第二,上述已说明该合金样品在热处理过程中没有发生再结晶,其原因除了极高的 Mo 当量外,就是该样品合金是较大尺寸的锻件。在该样品锻造过程初期和中期,由于变形量大,变形温度高,合金已经发生动态再结晶,而到了锻造终期的道次变形过程中,由于变形量很小,基本对前面生成的再结晶组织没有影响,反而是在回炉加热过程中导致了再结晶组织的长大,合金内基本不存在应变能,所以再结晶不易发生。因此,2#热处理工艺对于一般的钛合金属于强化热处理,但对于 Ti40 合金没有强化效果。

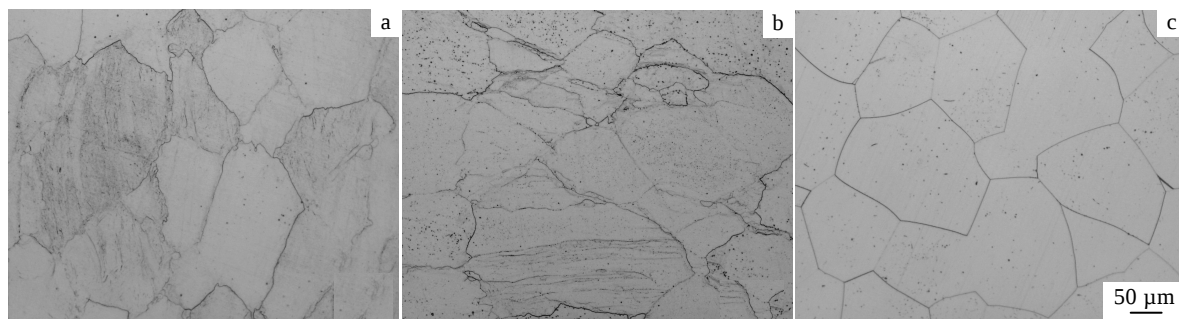


图1 合金锻态及2种不同热处理工艺下的 OM 组织

Fig.1 OM images of Ti40 alloy: (a) as-forged, (b) heat treatment 1#, and (c) heat treatment 2#

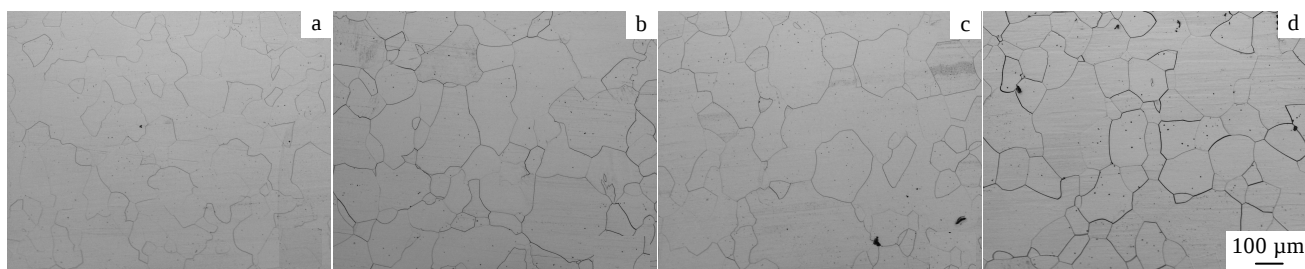


图2 合金经不同温度固溶后的组织

Fig.2 OM images of Ti40 after solution treatment at different temperatures for 1 h: (a) 750 °C, (b) 780 °C, (c) 800 °C, and (d) 820 °C

3.2 热稳定性能

文献[14]中曾指出,在热暴露过程中,第二相在晶界析出是 Ti40 合金的一个重要特点,也是导致 Ti40 合金热稳定性能恶化的一个重要原因。并提出可以通过热处理方式来调整析出物的位置和析出物的量,从而提高合金热稳定性能。从本试验结果可以看出,1#退火处理合金拥有更好的热稳定性能,即具有更好弯

曲晶界组织的热稳定性能,这主要可以从晶界析出物量方面来考虑,在晶粒尺寸相差不大的情况下,弯曲晶界大大增加了合金的晶界面积,降低了单位晶界析出物的量,从而减小了析出物对晶界的弱化作用;此外,相对于稳定的平直晶界,600 °C 的退火工艺,使晶内原保留部分能量较高的加工缺陷,为合金晶内提供了形核机会,使析出物更趋于均匀,同时,也降低

析出物对晶界的影响。因此, 1#热处理工艺的试样比经过 2#热处理工艺的试样具有更好热稳定性。

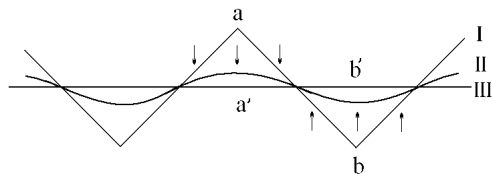


图 3 合金晶界在热处理过程种的变化示意图

Fig.3 Simulated diagram of grain-boundary evolution during heat treatment process

3.3 蠕变性能

无论是从蠕变的本构关系还是从蠕变的实际测试方法来看, 决定合金蠕变性能的主要有 2 个参数, 1 个是蠕变测试温度, 另 1 个是蠕变施加应力。在低温下, 只有当外应力超过位错障碍产生的内应力时(阻力)位错才能滑移, 产生应变; 但是在高温下, 有些障碍是可以在热激活的帮助下越过的, 即位错可以借助外应力和热激活的共同作用越过障碍而滑移, 这就是蠕变过程中应力和温度协同作用机制。这种位错通过热激活帮助越过障碍的过程其实也就是扩散的过程, 正是通过这种扩散, 回复了合金内部由位错塞积而产生的应力集中, 使得位错滑移能够继续进行下去, 这就是蠕变变形的实质。障碍对位错运动的阻力分为两类, 一类是长程内应力, 是晶体内所有位错、缺陷的弹性应力场的叠加, 这种应力以相当大的波长在晶体空间波动; 第二类是短程的局部障碍, 如不同类型的气团、林立位错、固溶原子等。对于 2 种不同热处理的 Ti40 合金组织, 通过分析, 可以认为第二类阻力相差不大, 因为无论是固溶原子、还是析出物方面, 两类热处理的差别都不大; 对于第一类阻力, 显然 1#热处理工艺的弯曲晶界拥有更高的内应力场, 这在本文 3.2 的组织分析中已经做过说明。对于 Ti40 合金, 在较低温度蠕变时, 由于温度低, 热激活能小, 弯曲晶界产生的内应力场对位错的滑移显得尤为重要, 这样应力场越大, 阻碍的不能激活的位错越多, 蠕变就越难以进行, 因此, 在较低温度蠕变时, 1#热处理工艺对应的组织拥有较好的蠕变性能。当温度升高时, 热激活扩散过程越来越显著, 决定合金蠕变应变的主要因素转变成成为扩散过程, 1#热处理相对于 2#热处理, 组织更不稳定, 晶界缺陷数量多, 这些都成为高温蠕变过程中的扩散通道, 加速扩散, 加速蠕变变形。因此, 2#热处理工艺对应的组织拥有更好的高温蠕变

性能。

4 结 论

1) 2 种不同热处理工艺对合金室温力学性能影响不大, 这主要是由 Ti40 合金成分决定的, 极高的 Mo 当量, 使得不同热处理工艺对合金晶粒大小和析出物多少基本没有影响。

2) 经 1#热处理工艺后的合金拥有更好的热稳定性性能。

3) 1#热处理工艺的组织更适应于较低温度的蠕变, 2#热处理工艺组织适应较高温度蠕变。

参考文献 References

- [1] Zhao Y Q, Zhou L. *Acta Metallurgic Sinica*[J], 2001, 13(1): 406
- [2] Zhao Yongqing(赵永庆), Zhou Lian(周 廉), Deng Ju(邓 炬). *Mechanical Engineering Materials*(机械工程材料)[J], 1999, (1): 9
- [3] Zhao Yongqing(赵永庆), Zhou Lian(周 廉), Deng Ju(邓 炬). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 1999, 28(3): 132
- [4] Zhao Y Q, Zhou L, Deng J. *Materials Science and Engineering A*[J], 1999, 267: 167
- [5] Zhao Y Q, Zhou L. *Journal of Materials Science and Technology*[J], 2001, 17(6): 677
- [6] Wu Huan(吴 欢), Zhao Yongqing(赵永庆), Qu Henglei(曲恒磊) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 32(1): 45
- [7] Zhao Y Q, Qu H L, Zhu K Y et al. *Materials Science & Engineering*[J], 2001, A316: 211
- [8] Zhao Y Q, Zhu K Y, Qu H L et al. *Materials Science & Engineering A*[J], 2000, 282: 153
- [9] Zhao Yongqing(赵永庆), Zhou Lian(周 廉), Deng Ju(邓 炬). *Mechanical Engineering Materials*(机械工程材料)[J], 2000(1): 14
- [10] Zhu KY, Zhao Y Q, Qu H L et al. *Journal of Materials Science*[J], 2004, 39: 2387
- [11] Xin Shewei(辛社伟), Zhao Yongqing(赵永庆), Zeng Weidong(曾卫东) et al. *Metal Heat Treatment*(金属热处理)[J], 2007, 32(9): 55
- [12] Wang Minmin(王敏敏), Zhao Yongqing(赵永庆), Zhou Lian(周 廉). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 23(2): 117
- [13] Zhao Y Q, Qu H L, Wang M M et al. *J Alloys Compd*[J], 2006, 407: 118

- [14] Xin S W, Zhao Y Q, Zeng W D *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 477: 372
- [15] Xin Shewei, Zhao Yongqing, Zeng Weidong. *Trans Nonferrous Met Soc China*[J], 2007, 17(s): 526
- [16] Xin Shewei(辛社伟), Zhao Yongqing (赵永庆), Zeng Weidong(曾卫东) *et al. Metal Heat Treatment*(金属热处理)[J], 2008, 33(5): 68
- [17] Xin Shewei(辛社伟), Zhao Yongqing(赵永庆). *Material Heat Treatment*(金属热处理)[J], 2006, 31(9): 39

Matching Relationship between Effect of Typical Heat Treatments and Mechanical Properties of Ti40 Alloy

Zhao Yongqing¹, Xin Shewei^{1,2}, Wu Huan¹, Yang Haiying¹, Li Qian¹

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

(2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710012, China)

Abstract: Based on previous research of Ti40 alloy two typical heat treatments were designed, e.g. 1#, 600 °C, 4 h AC; 2#, 850 °C, 1 h WQ +550 °C, 6 h AC. The microstructures, mechanical properties at room-temperature, thermal stability and creep properties of the alloy treated by the two heat treatments were tested. The result show that the difference of their microstructures is mainly in the respect of their grain boundary, e.g. the grain boundary of the alloy by 1# heat treatment is unsmooth and ragged and the ones by 2# heat treatment are smooth and straight. The mechanical properties indicated the difference of the microstructures leads a little effect on properties at room-temperature. Relatively speaking, the microstructure with the unsmooth grain boundary after 1# heat treatment brings good thermal stability and creep properties at lower temperature, and the microstructure with the straight boundary after 2# heat treatment brings good creep properties at higher temperature. The mechanism of the effect of different grain boundaries on thermal stability and creep properties was also discussed in this paper.

Key words: Ti40 alloy; heat treatment; thermal stability; creep

Biography: Zhao Yongqing, Ph. D., Professor, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P. R. China, Tel: 0086-29-86231078, E-mail: nwpu_xsw@126.com