

热处理对 Ti-35V-15Cr-0.15Si-0.05C 合金热稳定性能的影响

Effect of Heat-treatment on the Microstructure and Thermal Stability Properties of Ti-35V-15Cr-0.15Si-0.05C Titanium Alloy

赵红霞, 黄旭, 王宝, 雷力明

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

ZHAO Hong-xia, HUANG Xu, WANG Bao, LEI Li-ming

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 通过对 Ti-35V-15Cr-0.15Si-0.05C 合金轧制环件取样进行热处理和热稳定性能实验,研究了 850℃ 和 950℃ 固溶处理和 950℃ 固溶后在 600℃ 和 700℃ 时效后的热稳定性能和微观组织。结果表明:合金仅经过固溶处理 α 相析出不明显,而经过固溶加时效处理后 α 相在晶界和晶内大量析出,在热稳定性能测试时,经过 540℃ 100h 热暴露后, α 相进一步析出。合金 α 相是影响合金拉伸性能的主要因素,在晶界析出的连续 α 相导致合金塑性急剧下降;通过 850℃ 固溶热处理能够获得较好的室温拉伸和热稳定性能。

关键词: 阻燃钛合金;微观组织;热暴露; α 相;碳化物

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.07.014

中图分类号: TG146.2⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)07-0073-05

Abstract: The thermal stability property and the microstructures of Ti-35V-15Cr-0.15Si-0.05C after solution and aging were studied. The solution temperature was 850℃ and 950℃ and the aging temperature was 600℃ and 700℃ after solution at the temperature of 950℃. The results showed the α phase had not separated out obviously when the alloys heat treatment by solution, and the α phase separated out a great deal in boundary and in grains after aging, and separated out more after 100 hours explored at 540℃. The α phase were the main factor which affected the thermal stability. The continuous α phase in the boundary of grains leded rapidly decreasing plasticity. The alloy heat treatment by 850℃ solution could obtain good and thermal stability.

Key words: burn resistant titanium alloy; microstructure; thermal exposure; α phase; carbides

钛合金因具有低密度、高比强度、良好的耐蚀性等优点而在先进航空发动机领域得到广泛的应用。燃气涡轮发动机的压气机机匣、叶片等部件都可采用钛合金制造。如美国第四代战斗机 F22 的 F119 发动机上的钛用量高达 39%。然而,在一定的温度、空气压力和气流环境下,常规钛合金容易被点燃而发生持续燃烧。因此,研制具有阻燃性能的钛合金成为发展高推比航空发动机的迫切要求。美国在 20 世纪 90 年代初研制成功一种 β 稳定元素高达 50% 的高稳定 β 型阻燃钛合金 Alloy C (名义成分为 Ti-35V-15Cr) 已被应用到 F119 发动机上。然而,虽然这种合金在 β 合金中含有最高 Mo 当量,但是经研究表明,高温长时间热暴露将导致这种 β 合金中析出少量 α 相^[1],从而降低了合

金的组织稳定性。经研究,Ti 的碳化物对合金中的间隙氧原子具有较强的吸收作用,可在一定程度上抑制 α 相的析出^[2],并且 Si 元素以固溶和析出硅化物 (Ti_5Si_3) 两种存在形式可以提高合金的性能^[3]。本工作在 Alloy C 合金的基础上,添加了微量 Si 元素和 C 元素,对 Ti-35V-15Cr-0.15Si-0.05C 合金经固溶时效热处理后的微观组织和热暴露性能进行了研究。

1 实验材料和方法

实验用 Ti-35V-15Cr-0.05C-0.15Si 合金试样取自经三次真空自耗电弧熔炼制成 25.2kg 铸锭,经过开坯锻造,最后轧制成为的环件。合金的化学成分见表 1。

表 1 实验合金的化学成分 (质量分数/%)

Table1 Chemical composition of the experimental alloy
(mass fraction/%)

| V | Cr | C | Si | Fe | Ti |
|-------|-------|------|------|------|-----|
| 35.16 | 14.74 | 0.07 | 0.17 | 0.11 | Bal |

沿环件弦向取试样,试样采用四种不同的热处理工艺处理,热处理制度见表 2。对比分析四种热处理工艺对实验材料的组织、室温拉伸、540℃(本合金期待使用温度)热暴露 100h 后的热稳定性能以及断口形貌的影响。

表 2 热处理工艺

Table 2 Heat treatment processes

| No | Heat treatment processes |
|----------------|--------------------------|
| 1 [#] | 950℃×1.5h,AC |
| 2 [#] | 850℃×1.5h,AC |
| 3 [#] | 950℃×1.5h,AC+700℃×4h,AC |
| 4 [#] | 950℃×1.5h,AC+600℃×4h,AC |

试样在 JSM-5600LV 型扫描电镜上进行微观组织和拉伸断口形貌的观察,在 JEOL 100CX 型透射电镜上进行 TEM 观察。

2 实验结果及讨论

2.1 热处理

经过四种不同热处理后工艺试样的微观组织见图 1。比较可以看出:经过 950℃固溶的 1[#],3[#] 及 4[#] 热处理工艺的试样已经完全再结晶。850℃固溶的 2[#] 热处理试样部分再结晶,出现一些细小的等轴晶粒,晶粒尺寸非常不均匀。

经过四种热处理后的试样均可以观察到有球状或者短棒状的第二相析出,另外固溶后时效处理的 3[#], 4[#] 热处理工艺的试样可以观察到明显的细小沉淀物,经 TEM 观察这两种第二相沉淀分别为碳化物和 α 相。从图 1 可以看出,仅通过固溶处理的试样(1[#] 和 2[#] 热处理工艺)基本观察不到 α 相的析出。而固溶加

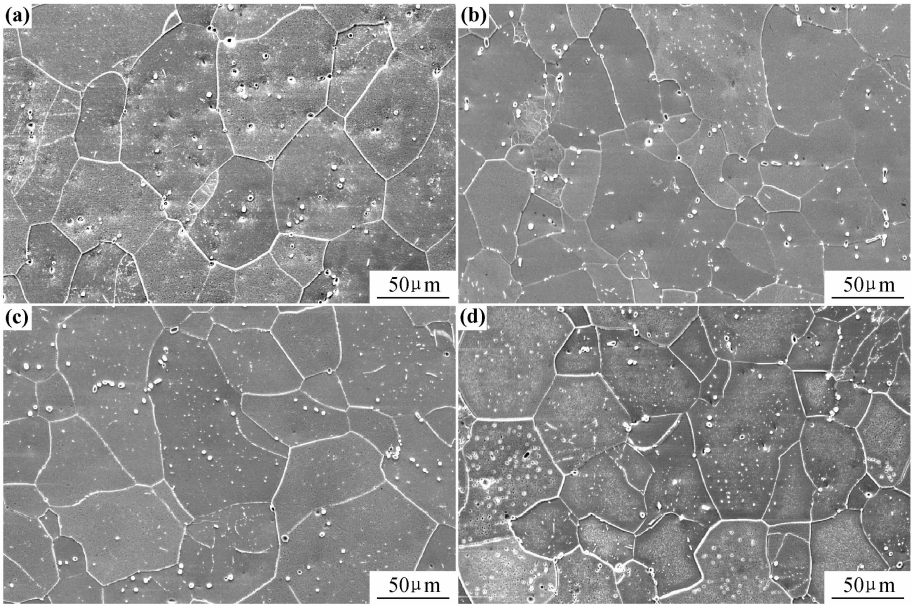


图 1 不同热处理后的微观组织

(a)1[#] 950℃×1.5h,AC;(b)2[#] 850℃×1.5h,AC;(c)3[#] 950℃×1.5h,AC+700℃×4h,AC;(d)4[#] 950℃×1.5h,AC+600℃×4h,AC

Fig.1 Microstructures under different heat treatment

(a)1[#] 950℃×1.5h,AC;(b)2[#] 850℃×1.5h,AC;(c)3[#] 950℃×1.5h,AC+700℃×4h,AC;(d)4[#] 950℃×1.5h,AC+600℃×4h,AC

时效热处理的试样在晶界和晶内析出大量的 α 相沉淀,尤其是经过低温时效的 4[#] 热处理试样,α 相在晶界大量连续析出,使晶界明显增粗。

α 相、碳化物、硅化物为本合金的主要析出相。析出相形貌见图 2。据研究,硅化物因析出尺寸细小,并多分布在晶界处,所以,在扫描电镜金相照片上无法观察到。分布在 β 基体中或晶界的细小弥散的碳化物颗

粒对细化晶粒起了积极的作用,它们不仅增加了再结晶的形核位置,而且钉扎了晶界的迁移运动。据研究,碳化物的体积分数主要取决于合金的碳含量,碳化物的形态也主要由锻造工艺和变形量决定^[6]。合金中塑性的差异与合金中的 α 相的析出行为密切相关,虽然 α 相能一定程度上强化基体,但对塑性的危害作用更大^[7]。

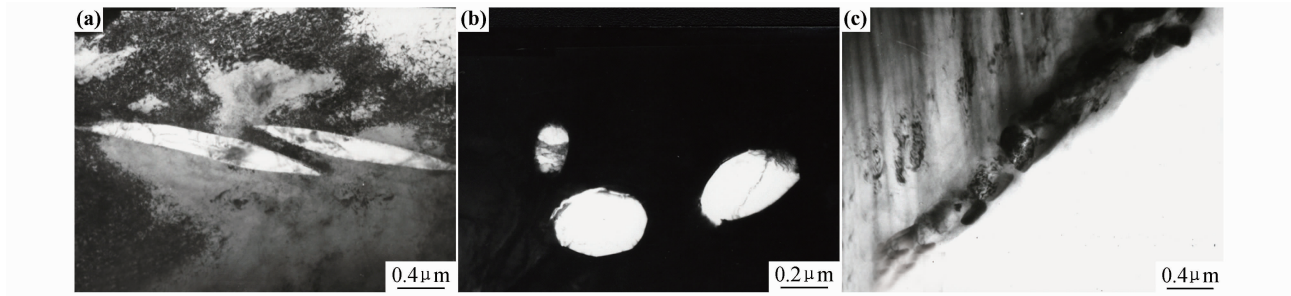


图 2 第二相析出相形貌 (a)α 相形貌;(b)碳化物形貌;(c)硅化物形貌
Fig.2 Morphology of the secondary phases (a)α phase;(b)carbides;(c)silicides

2.2 热暴露后组织

不同热处理工艺的试样在 540℃ 高温热暴露 100h

后的微观组织见图 3。

经过比较可以看出,仅经过固溶处理的 1# 和 2#

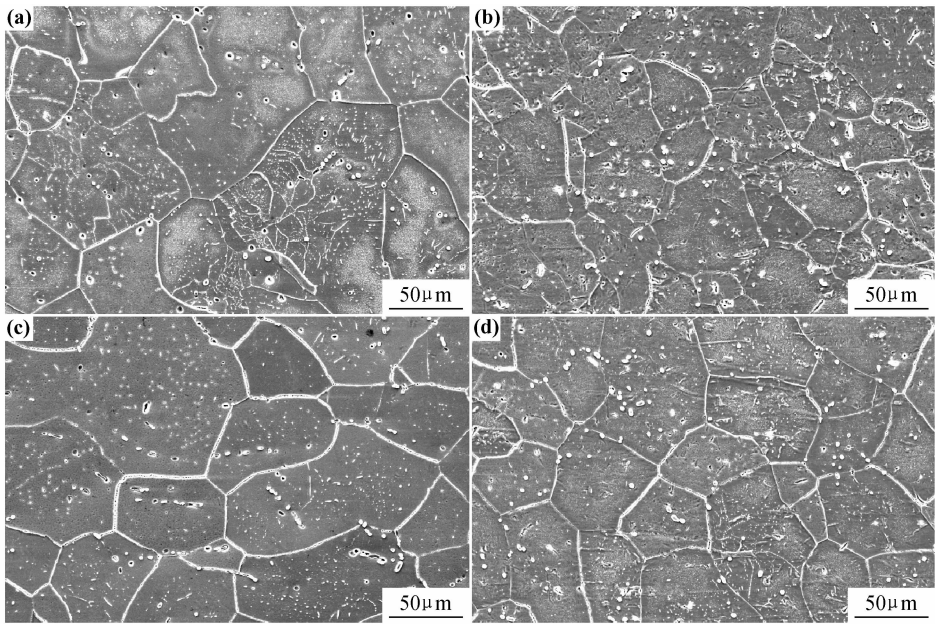


图 3 不同热处理试样热暴露后微观组织

(a)1# 950℃ × 1.5h, AC; (b)2# 850℃ × 1.5h, AC; (c)3# 950℃ × 1.5h, AC + 700℃ × 4h, AC; (d)4# 950℃ × 1.5h, AC + 600℃ × 4h, AC

Fig.1 Microstructures of thermal exposure after different heat treatment

(a)1# 950℃ × 1.5h, AC; (b)2# 850℃ × 1.5h, AC; (c)3# 950℃ × 1.5h, AC + 700℃ × 4h, AC; (d)4# 950℃ × 1.5h, AC + 600℃ × 4h, AC

热处理试样在热暴露后 α 相在晶界和晶内析出,其中 950℃ 固溶的 1# 热处理试样 α 相析出量明显多于 850℃ 固溶的 2 号热处理试样,并且有连接成网状的趋势。3# 和 4# 热处理在 700℃ 和 600℃ 时效时析出大量的 α 相,在随后的热暴露中,除了产生新的 α 相,原有的 α 相还会继续长大。1# 固溶处理后,热暴露过程相当于在 450℃ 进行了一个长期时效,由于温度比 3# 和 4# 的时效温度低,使得其析出的 α 数量和尺寸都会稍有减小。与 1# 相比,2# 热处理试样 α 相在晶内呈细小的麻点状析出。研究表明,α 优先于晶界和晶内的点缺陷和位错处析出,高温固溶进一步降低了晶界内的位错密度,使得 α 相在晶界析出增多^[8]。与热暴露前

微观组织相比,热暴露后 α 相在晶内和晶界的析出数量进一步增加,特别是经过时效处理后的 3# 和 4# 试样在优先形核、长大的晶界上形成了连续粗化的 α 膜。α 相的析出恶化了合金的性能,尤其在晶界连续析出的 α 相形成膜,破坏了晶界的连续性,大幅度降低了合金的塑性。

2.3 拉伸性能

热处理制度对合金的室温拉伸和热暴露性能的影响见图 4。由图 4 可以看出,热暴露前,950℃ 固溶的 1# 热处理试样具有较高的强度,而塑性较低。经过 850℃ 固溶的 2# 热处理试样强度相对稍低,但其塑性是四种热处理工艺中最高的,4# 热处理试样的强度较

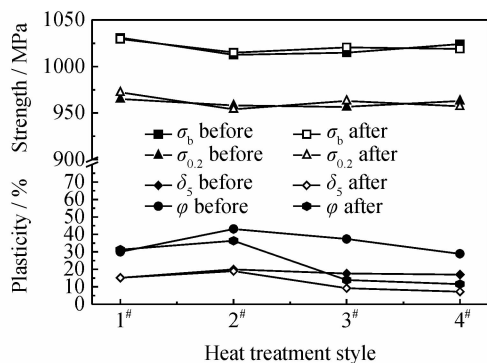


图4 合金经过四种热处理后室温拉伸和热稳定性能

Fig. 4 The tensile properties and thermal stability of the alloy under different heat treatment

高,而塑性最低。经过 540℃/100h 热暴露后材料的强

度变化不大,950℃固溶的 1# 热处理工艺塑性没有明显下降,其余热处理工艺塑性明显下降。但经过 850℃固溶的试样经过 540℃/100h 热暴露后仍具有最高的塑性。联系微观组织可以看出,α 相与塑性密切相关。经过时效的 3# 和 4# 热处理工艺热暴露前析出 α 相导致塑性较低。热暴露后,四种热处理工艺下的试样致 α 相的析出持续增多,从而使塑性明显下降。在 3# 和 4# 热处理工艺下热暴露后 α 相在晶界析出,甚至连续成膜,导致塑性降低了 50%。由拉伸性能可以看出,850℃固溶 1.5h 的 2 号热处理工艺具有较好的塑性和强度的匹配,热稳定性能也较好。

2.4 断裂特征

合金室温拉伸和热暴露后拉伸的端口形貌见图 5 和图 6 所示。

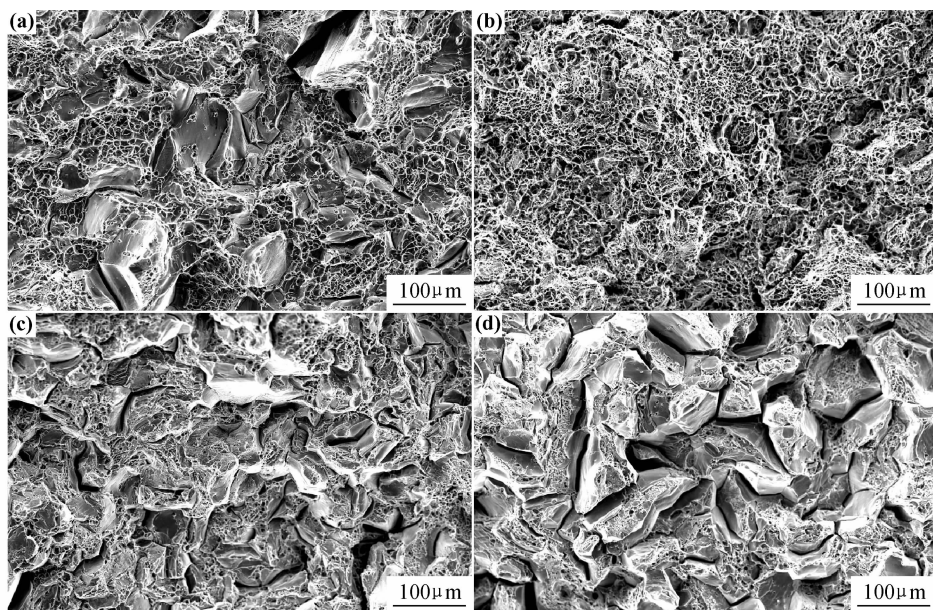


图5 不同热处理试样室温拉伸断口

(a)1# 950℃×1.5h, AC; (b)2# 850℃×1.5h, AC; (c)3# 950℃×1.5h, AC+700℃×4h, AC; (d)4# 950℃×1.5h, AC+600℃×4h, AC

Fig. 5 The tensile fractographs under different heat treatment

(a)1# 950℃×1.5h, AC; (b)2# 850℃×1.5h, AC; (c)3# 950℃×1.5h, AC+700℃×4h, AC; (d)4# 950℃×1.5h, AC+600℃×4h, AC

1# 热处理试样在热暴露前以韧性断裂为主,断口上除韧窝外还能看到一些二次沿晶裂纹,表明有少量沿晶断裂发生。热暴露后试样断口基本呈脆性沿晶断裂特征。2# 热处理试样在热暴露前的断口布满细小的韧窝,验证了其较好的塑性,而热暴露后,断口出现部分沿晶断裂的形貌。而 3# 和 4# 热处理试样在热暴露前断口就出现部分沿晶断裂,热暴露后,由于塑性下降,断口更呈现出“冰糖”状的解理断裂形貌。

断口分析进一步说明 α 相降低了合金的塑性,特

别是晶界 α 膜的存在导致了脆性沿晶断裂的发生,由于这种原因,热暴露后的合金试样尚未达到基体断裂强度之前就发生了沿晶脆断,其拉伸强度明显下降。另外,在各试样沿晶断裂的断口晶界表面还可看出碳化物颗粒的分布,表明在 β 晶界上分布着一些碳化物,它们对合金塑性也产生了一些不利影响。

3 结论

(1)本合金仅经过固溶处理 α 相析出不明显,而经

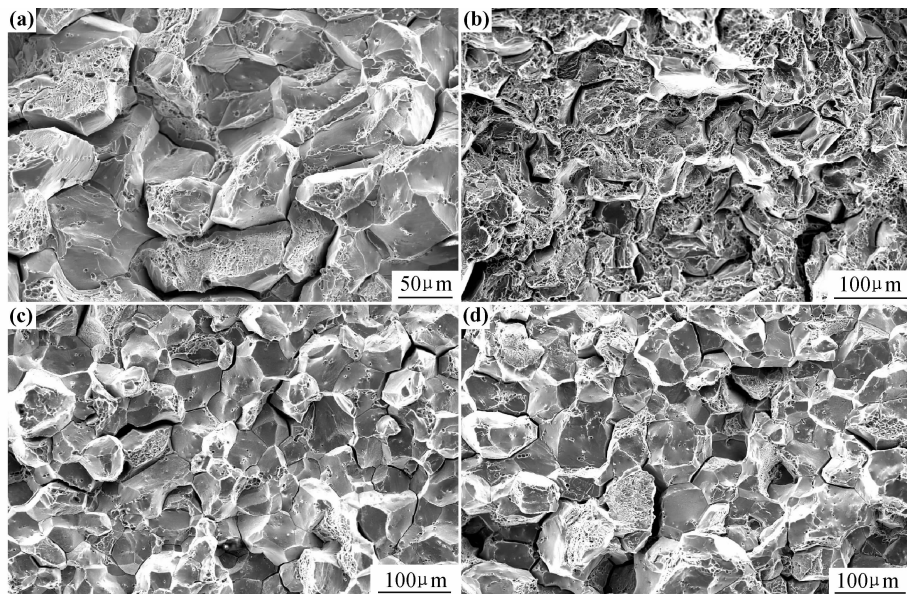


图6 不同热处理试样热暴露后断口形貌

(a)1# 950℃×1.5h, AC; (b)2# 850℃×1.5h, AC; (c)3# 950℃×1.5h, AC+700℃×4h, AC; (d)4# 950℃×1.5h, AC+600℃×4h, AC

Fig. 6 The fractographs of thermal exposure after different heat treatment

(a)1# 950℃×1.5h, AC; (b)2# 850℃×1.5h, AC; (c)3# 950℃×1.5h, AC+700℃×4h, AC; (d)4# 950℃×1.5h, AC+600℃×4h, AC

过固溶+时效处理的后 α 相在晶界和晶内大量析出。

(2)540℃100h 热暴露促使 α 相进一步析出,特别是合金经过固溶+时效热处理后进行热暴露, α 相在晶界和晶内大量析出,在晶界连续成网状。

(3) α 相的析出降低了合金的塑性,特别是在晶界连续析出的 α 相导致合金的脆性沿晶断裂。

(4)对本合金实验的四种热处理工艺中,仅固溶处理工艺的室温拉伸性能和热稳定性能优于固溶+时效热处理工艺,850℃×1.5h 热处理可使合金获得较好的室温和热稳定性能。

(5)在晶界分布的碳化物颗粒对合金塑性也产生了一些不利影响。

参考文献

- [1] BOYER R R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry[J]. Materials Science and Engineering A, 1996, 213: 103—114.
- [2] LI Y G, BLENKINSOP P A, LORETTO M H, et al. Effect of carbon and oxygen on microstructure and mechanical properties of Ti-25V-15Cr-Al alloy [J]. Acta Mater, 1999, 47(10): 2889—2892.
- [3] 雷力明, 黄旭, 孙福生, 等. 碳化物分布状态对 Ti-25V-15Cr-2Al-0.2C-x 合金微观组织的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(6): 632—634.
- LEI Li-ming, HUANG Xu, SUN Fu-sheng, et al. Effect of the

distribution state of the carbide on microstructure of Ti-25V-15Cr-2Al-0.2C-x alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2004, 33(6): 632—634.

- [4] MURRAY J L. Phase Diagram of Binary Titanium Alloys[S]. ASM International, Materials Park, 1987: 47—50.
- [5] LI Y G, LORETTO M H, RUGG D, et al. Effect of heat treatment and exposure on microstructure and mechanical properties of Ti-25V-15Cr-2Al-0.2C alloy [J]. Acta Mater, 2001, 49: 3011—3015.
- [6] 雷力明. 低成本 β 稳定型阻燃钛合金的微观组织和力学性能研究[D]. 北京: 北京航空材料研究院, 2001.
- [7] HANDA S, IZUMI O. Correlation of stability in commercial β -phase titanium alloys[J]. Metallurgical Transactions A, 1987, 18(2): 265—271.
- [8] 赵永庆, 朱康英, 曲恒磊, 等. β 型 Ti40 阻燃钛合金高温长期作用的第二相及其对性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2002, 31(2): 84—86.
- ZHAO Yong-qing, ZHU Kang-ying, QU Heng-lei, et al. The second phases and their effects on properties in Ti-40 burn resistant titanium alloy thermally exposed of long time[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2002, 31(2): 84—86.

收稿日期: 2012-01-11; 修订日期: 2012-11-20

作者简介: 赵红霞(1977—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为铸造钛合金, 联系地址: 北京 81 信箱 21 分箱(100095), E-mail: zhaohongxia1024@yahoo.com.cn