

文章编号:1673-9981(2010)04-0514-04

β 型 γ -TiAl合金的制备及其反常屈服行为研究

杨非¹, 陈玉勇², 蔡一湘¹, 孔凡涛², 肖树龙²

(1. 广州有色金属研究院粉末冶金研究所, 广东 广州 510650;
2. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: β 型 γ -TiAl合金具有良好的高温变形能力,为TiAl合金的发展开辟了新的发展方向.采用水冷铜坩埚真空感应熔炼技术制备了 β 型 γ -TiAl合金,即Ti-45Al-9(V,Nb,Y)合金,研究了该合金的铸态组织、相组成及力学性能.结果表明,Ti-45Al-9(V,Nb,Y)合金的铸态组织为近层片组织结构,主要由 γ -TiAl相、 α_2 -Ti₃Al相及 β (B2)相组成.室温条件下,该合金的屈服强度为393MPa,700℃时合金的屈服强度为562MPa,当测试温度升高到800℃时,合金的屈服强度为420MPa.该合金表现出了明显的反常屈服行为.

关键词: TiAl合金; 组织; 性能; 反常屈服行为
中图分类号: TG146.2.3 **文献标识码:** A

随着全球气候变暖趋势日益明显,对低能耗、低排放、低污染等技术要求越来越迫切.研究发现,汽车每降低10%的车重,废气排放量可减少10%,燃料消耗节省7%^[1].因此,汽车的轻量化将起到节能、环保的双重作用.TiAl基合金由于具有低密度、高弹性模量、高的比强度、高的高温强度、良好的抗蠕变能力以及优异的防腐蚀性能等优点,被认为是非常具有潜力的轻质耐高温结构材料,在汽车发动机高温结构材料领域具有广阔的应用前景,近年来引起了研究者的广泛关注^[2-5].

然而,由于TiAl合金室温塑性低,高温变形能力不足,热加工困难,成型性差,限制了其广泛应用.近来,美国学者Y. W. Kim提出了 β 型 γ -TiAl合金的概念^[6],该合金具有较好的高温变形能力,为TiAl合金的发展提出了新的方向.本文采用水冷铜坩埚真空感应熔炼技术制备了高质量Ti-45Al-9(V,Nb,Y) β 型 γ -TiAl合金,对该合金的组织结构、相组成及力学性能进行了研究.

1 实验方法

实验用原材料为海绵钛(纯度>99.7%),高纯铝(纯度>99.99%)以及铝钒、铝铌和铝钽中间合金.

首先采用水冷铜坩埚真空感应熔炼炉进行熔炼,制备铸锭,然后在温度为900℃条件下,对合金铸锭均匀化处理60h,随后对合金铸锭进行热等静压处理,以消除或减少合金铸锭的缩孔、疏松等缺陷,热等静压处理温度为1200℃,压力为140MPa,时间为4h.

分别采用X射线衍射分析(XRD)、光学显微分析(OM)及扫描电子显微分析(SEM)等方法,对Ti-45Al-9(V,Nb,Y)合金铸锭进行相分析及显微组织观察.合金的拉伸性能测试在Instron万能试验机上进行,应变速率为 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.

收稿日期:2010-10-16

作者简介:杨非(1982—),男,内蒙古锡林浩特人,博士.

2 结果及讨论

2.1 铸态合金的相组成及显微组织

图1为Ti-45Al-9(V,Nb,Y)合金的XRD衍射图谱.由图1可知,采用水冷铜坩埚真空感应熔炼法所制备的Ti-45Al-9(V,Nb,Y)合金主要由γ,α₂和β(B2)三相组成.合金的铸态显微组织(图2)可以看出,Ti-45Al-9(V,Nb,Y)合金为近层片组织结构,其平均层片团簇的尺寸约为100 μm.与传统的TiAl合金相比,Ti-45Al-9(V,Nb,Y)合金显微组织没有显著的柱状晶特征,而是体现了等轴特征.在层片组织边界存在亮灰色和黑色块状组织(如图2(b)),经能谱分析,亮灰色块体中富含V,Nb等β相稳定元素,黑色块体的成分为w(Ti)=43.79%,w(Al)=49.09%,w(V)=3.59%和w(Nb)=3.54%.

结合XRD分析结果,认为亮灰色块体为β(B2)相,黑色块体为γ相.

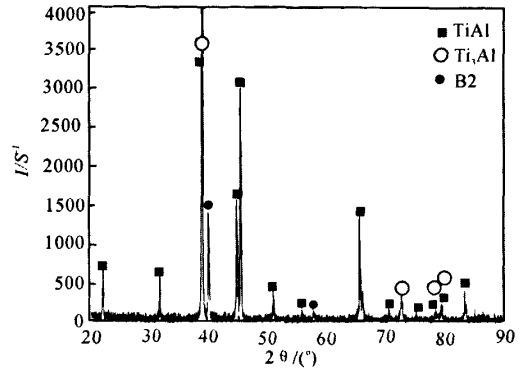


图1 水冷铜坩埚真空感应熔炼Ti-45Al-9(V,Nb,Y)合金的XRD图谱

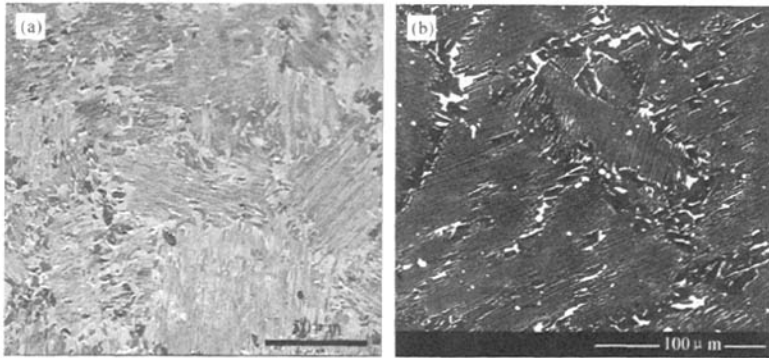


图2 水冷铜坩埚真空感应熔炼Ti-45Al-9(V,Nb,Y)合金铸态组织

研究认为V和Nb元素均为β相稳定元素,在TiAl合金中添加该类元素促进了合金的凝固过程由α相凝固方式向β相凝固方式转变^[7-9].由于β相中优先生长方向<100>晶向具有等价的三个方向,即<100>,<010>和<001>,而不像α相中只有一个<001>晶向为晶体优先生长方向,因此经β相凝固方式凝固的合金具有等轴状特征,而柱状晶特征并不显著.

根据相图分析可知,Ti-45Al-xV合金的平衡凝固路线和相转变过程为L→β→α→α+γ→α+β+γ→β+γ,其中β相有序化形成B2相,其有序化温度约为1100℃^[9].按照上述凝固路线凝固后,合金的平衡凝固组织应该为β+γ双相组织,而不是α+β+

γ三相组织.但是由于合金熔体受到金属型壁的激冷作用,而产生较大的过冷度以及与外界强烈的热交换作用,合金的实际凝固过程往往偏离平衡凝固方式,最终获得的合金组织不同于合金平衡凝固的组织.结合Ti-45Al-9(V,Nb,Y)合金的铸态组织特征,可以推测该合金凝固方式和相转变过程遵从的路线为L→L+β→β→β+α→α→α+γ→α+γ+β→α+α₂+γ+β→lamellar(α₂/γ)+γ+β.其中β相有两种来源,一种是由于V和Nb元素的稳定作用导致β相直接从液相析出并保留至室温,另一种是由α相分解得到的.层片结构由高温α相转变而来,同时β+γ相结构是由γ相从高温α相或β相的析出而形成的.最终Ti-45Al-9(V,Nb,Y)合金形成了层片团

簇被 $\beta(B2)$ 相和 γ 相包围的近层片组织结构。

2.2 铸态合金的力学性能

图 3 为铸态 Ti-45Al-9(V, Nb, Y) 合金在不同温度下的拉伸力学性能。从图 3 可以看出, 温度对 Ti-45Al-9(V, Nb, Y) 合金的屈服强度和延伸率有重要的影响。随着测试温度的升高, 铸态合金的屈服强度表现为先升高后下降的趋势, 而铸态合金的延伸率则随着测试温度的升高而持续增加。在室温条件下, 铸态 Ti-45Al-9(V, Nb, Y) 合金的拉伸屈服强度和延伸率分别为 393 MPa 和 0.55%, 而当测试温度升高到 700 °C 时, 合金的屈服强度达到了最大值, 为 562 MPa, 延伸率为 7.6%。随着测试温度继续升高, 合金的屈服强度下降, 延伸率增加, 当测试温度为 800 °C 时, 铸态 Ti-45Al-9(V, Nb, Y) 合金的屈服强度为 420 MPa, 延伸率高达 18.4%。

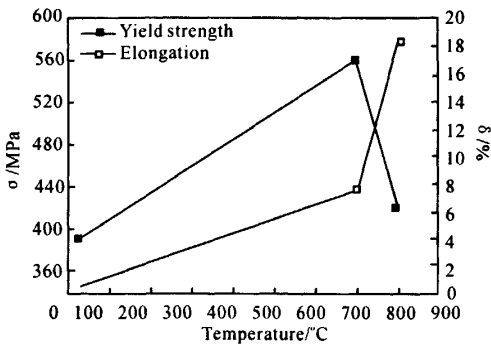


图 3 温度对铸态 Ti-45Al-9(V, Nb, Y) 合金拉伸性能的影响

屈服强度反常温度关系的本质与金属间化合物的位错运动和滑移特性密切相关。金属间化合物的位错运动难易不仅与位错总的柏氏矢量长度有关, 而且还与位错分解形成 APB, SISF 或 CSF 等任何形式的层错能量有关^[10-12]。TiAl 合金的屈服强度反常温度关系与 γ 相中 $1/2[\bar{1}10]$ 普通螺位错和 $[101]$ 超位错的交滑移有关。在低温条件下 (小于 500 °C), 由于普通位错的临界剪切应力 (CRSS) 大于超位错的临界剪切应力, 所以低温条件下普通位错不易发生滑移现象, 而超位错相对较易滑动^[12-13]。在变形过程中超位错易在 (111) 上发生交滑移并分解为 $[\bar{1}01] = 1/6[112] + 1/3[201] + 1/6[112]$, 在 (111) 和 ($\bar{1}11$) 晶面之间产生一个 SISF, 形成了非平面位错核心结构, 该非平面位错核心结构不可动, 从而对位错起到了钉扎作用。在高温条件下 (大于 500 °C), 随着

温度的升高, 普通位错的滑移可以开动^[13], $\{111\}$ 滑移面上的一个螺位错的几小部分或部分螺位错交滑移到 APB 或 SISF 能量较低的 $\{100\}$ 或 $\{11\bar{1}\}$ 滑移面, 造成非平面的位错结构, 成为不可动位错锁, 对位错起到钉扎作用。位于两个钉扎点之间的位错必须通过弯曲绕过钉扎点而运动, 因而两个钉扎点之间的距离或钉扎点的数量决定了强化的程度。由于交滑移是一个热激活过程, 温度升高有利于交滑移的进行, 且呈指数关系增加。因此, 随着温度的升高, 钉扎点之间距离的减小, 位错锁对位错的钉扎作用增强, 位错运动的阻力增加, 在宏观上表现为合金的屈服强度随着温度的增加而增大。除此之外, Feng 等人^[14] 发现在 $\{110\}$ 面上, 位错可以以单交滑移模式、双交滑移模式、位错环模式以及位错偶极子的形成等模式发生钉扎现象, 从而导致位错阻力增加, 位错不可开动, TiAl 合金的屈服强度增加。总之, 在 γ -TiAl 合金中, 随着温度的增加, 超位错和普通位错的滑移依次开动, 由于位错发生分解及交滑移作用, 在 $\{111\}$, $\{100\}$, 或 $\{11\bar{1}\}$ 面上产生位错的钉扎现象, 限制了位错的运动, 随着温度的增加, 这种钉扎作用逐渐增强, 直到达到最大值。宏观上体现为 γ -TiAl 合金的屈服强度随着温度的增加而不断增加, 直到屈服强度达到最大值。当温度高于屈服强度峰值的温度时, 由于热激活作用显著增强, 位错锁被解锁, 位错运动重新被开动。此外, γ -TiAl 合金中孪晶变形成为主要的变形方式, 故屈服强度的反常温度现象消失, γ -TiAl 合金的屈服强度随着温度的增加而逐渐减小。

对于具有 B2 结构的金属间化合物来说, 由于存在高浓度的不可动的热激活空位, 热变形过程中可对位错的滑移起到钉扎作用^[15]。故可以预见, 随着温度的升高位错可动性增强, 热激活空位对位错的钉扎作用逐渐增加, 导致 $\beta(B2)$ 相出现屈服强度随着温度的升高而增大的现象。当温度升高到一定值时, 热激活效果变得更加显著, 热激活空位可以与位错核发生反应而消失, 位错的钉扎作用随之消失, $\beta(B2)$ 相的屈服强度开始下降, 屈服强度的反常温度现象消失。

Ti-45Al-9(V, Nb, Y) 合金主要由 γ -TiAl 相, α_2 -Ti₃Al 相及 $\beta(B2)$ 相组成。由上述分析可知, γ -TiAl 相和 $\beta(B2)$ 相在变形过程中很容易发生屈服强度反常温度现象。因此, 该合金在拉伸测试中表现出了强烈的屈服强度反常温度关系。

3 结论

(1)采用水冷铜坩埚真空感应熔炼技术成功地制备了Ti-45Al-9(V,Nb,Y)合金铸锭,该合金主要由 γ -TiAl相, α_2 -Ti₃Al相和 β (B2)相组成,组织为近层片组织结构,平均层片团簇尺寸为100 μm ;

(2)Ti-45Al-9(V,Nb,Y)合金具有明显的反常屈服行为,室温条件下合金的屈服强度为393 MPa,延伸率为0.55%;700℃时,合金的屈服强度明显增加为562 MPa,延伸率为7.6%;800℃时,合金的屈服强度为420 MPa,延伸率为18.4%。

参考文献:

- [1] 肖永清. 诠释现代车用钛合金的应用及前景[J]. 铝加工技术工程,2008(1):41-43.
- [2] EDWARD A L. Gamma titanium aluminides as prospective structural materials[J]. Intermetallics,2000(8):1339-1345.
- [3] 陈玉勇,孔凡涛. TiAl基合金新材料研究及精密成形[J]. 金属学报,2002,38:1141-1148.
- [4] NABARRO F R N. Two-phase materials for high-temperature service [J]. Intermetallics, 2000(8):979-985.
- [5] TOSHIMITSU T. Development of a TiAl turbocharger for passenger vehicles [J]. Materials Science and Engineering,2002, A329-331:582-588.
- [6] KIM Y W, DIMIDUK D, WOODWARD C. Development of beta γ -TiAl alloys: Opening robust processing and greater application potential for TiAl-base alloys [C]// The 11th World Conference on Titanium. Kyoto: The Japan Institute of Metals,2007.
- [7] JIN Y G, WANG J N, YANG J, WANG Y. Micro-structure refinement of cast TiAl alloys by β solidification[J]. Scripta Materialia,2004,51:113-117.
- [8] XU X J, LIN J P, WANG Y, GUO J F, et al. Micro-structure and tensile properties of as-cast Ti-45Al-(8-9) Nb-(W, B, Y) alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds,2006,414:131-136.
- [9] TAKEYAMA M, KOBAYASHI S. Physical metallurgy for wrought gamma titanium aluminides microstructure control through phase transformations[J]. Intermetallics,2005,13:993-999.
- [10] KAWABATA T, KANAI T, IZUMI O. Positive temperature dependence of the yield stress in TiAl L10 type superlattice intermetallic compound single crystals [J]. Acta Metallurgy,1985, 33:1355-1366.
- [11] HAHN Y D, WHANG S H. Deformation and micro-structure in L10 type Ti-Al-V alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A,1995,26:113-131.
- [12] JIAO Z, WHANG S H, YOO M H, et al. Stability of ordinary dislocations on cross-slip planes in γ -TiAl[J]. Materials Science and Engineering A,2002, 329-331: 171-176.
- [13] JIAO Z, WHANG S H, WANG Z. Stability and cross-slip of [101] superdislocations in γ -TiAl[J]. Intermetallics,2001,9:891-898.
- [14] WHANG S H, FENG Q, WANG Z M. Deformation characteristics and dislocation structures in single phase gamma titanium aluminides[J]. Intermetallics,2000,8: 531-537.
- [15] MORRIS D G, MUNOZ-MORRIS M A. A re-examination of the pinning mechanisms responsible for the stress anomaly in FeAl intermetallics[J]. Intermetallics,2010(18):1279-1284.

Preparation and anomalous yield behavior of β γ -TiAl alloy

YANG Fei¹, CHEN Yu-yong², CAI Yi-xiang¹, KONG Fan-tao², XIAO Shu-long²

(1. Department of Powder Metallurgy, Guangzhou Research Institute of Non-ferrous Metals, Guangzhou 510650, China. 2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: β γ -TiAl owned excellent deformability at high temperature and it was regarded as a new material which exhibited potential for using in different fields in the future. In this paper, Ti-45Al-9(V,Nb,Y) alloy, a new β γ -TiAl alloy, was prepared successfully by Induction Skull Melting (ISM) technology in water-cooled copper crucible, and its microstructure, phase constitution and mechanical properties were investigated. The results showed that Ti-45Al-9(V,Nb,Y) alloy, with nearly lamellar structure, was composed of γ -TiAl, α_2 -Ti₃Al and β (B2) phases, and had obvious anomalous tensile behavior. The yield strength of Ti-45Al-9(V,Nb,Y) alloy was 393MPa at room temperature, 562MPa at 700℃ and 420MPa at 800℃, respectively.

Key words: TiAl alloy; Microstructure; properties; anomalous yield behavior