

引用格式: 刘天翼, 李重阳, 于仓瑞, 等. 氧含量对 ZTA15 钛合金显微组织和力学性能的影响[J]. 航空材料学报, 2025, 45(2): 66-72.

LIU Tianyi, LI Chongyang, YU Cangrui, et al. Effect of oxygen content on microstructure and mechanical properties of ZTA15 titanium alloy [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(2): 66-72.

氧含量对 ZTA15 钛合金显微组织和力学性能的影响

刘天翼^{1*}, 李重阳¹, 于仓瑞², 刘时兵¹, 史昆¹, 曲赫威¹

(1. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司 高端装备铸造技术全国重点实验室, 沈阳 110022; 2. 北京星航机电装备有限公司, 北京 100074)

摘要: 通过悬浮熔炼工艺制备氧含量为 0.08% (质量分数, 下同)、0.12%、0.16% 和 0.2% 的 ZTA15 钛合金铸锭, 利用 OM、SEM 和 XRD 等设备研究氧含量对 ZTA15 钛合金显微组织及力学性能的影响。研究表明: 4 种不同氧含量的 ZTA15 组织均为典型的魏氏组织。随着氧含量的增加, α 集束的长度变短, 方向变得混乱, 4 种合金 α 板条片层宽度逐渐减小, 分别为 3.92、3.06、2.49 μm 和 2.77 μm 。随着氧含量的增加对合金的固溶强化效果增强, 合金抗拉强度和屈服强度整体呈现出先升高后降低的趋势, 塑性降低。氧含量为 0.16% 时合金屈服强度和抗拉强度最高分别为 1037 MPa 和 909 MPa, 当氧含量为 0.2% 时合金强度明显降低主要是因为形成了粗大的 α 相组织, 此时合金塑性最低。

关键词: 钛合金; ZTA15; 氧含量; 显微组织; 力学性能

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2024.000080

中图分类号: V252.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2025)02-0066-07

Effect of oxygen content on microstructure and mechanical properties of ZTA15 titanium alloy

LIU Tianyi^{1*}, LI Chongyang¹, YU Cangrui², LIU Shibing¹, SHI Kun¹, QU Hewei¹

(1. National Key Laboratory of Advanced Casting Technologies, China Academy of Machinery Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., Shenyang 110022, China; 2. Beijing Xinghang Electro-mechanical Equipment Co., Ltd., Beijing 100074, China)

Abstract: ZTA15 titanium alloy ingots, containing oxygen levels of 0.08%, 0.12%, 0.16%, and 0.2% (mass fraction), are produced through the levitation melting technique. The effect of oxygen content on the microstructure and mechanical properties of the alloy is examined using optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), and X-ray diffraction (XRD). The results show that all four ZTA15 structures, varying in oxygen content, are typical Weisberg morphologies. As oxygen content increase, the α -phase bunches shorten and their orientation become more disordered. Furthermore, the widths of the α -slats in the four alloys decrease progressively, measuring 3.92, 3.06, 2.49 μm , and 2.77 μm , respectively. Initially, as oxygen content rose, both tensile and yield strengths of the alloy increase, followed by a decrease, with a concurrent decline in plasticity. Notably, the alloy with 0.16% oxygen demonstrate peak yield and tensile strengths of 1037 MPa and 909 MPa, respectively. However, when oxygen content reach 0.2%, a significant strength reduction is observed, primarily due to the formation of a coarse α -phase structure, resulting in the lowest elongation among the alloys.

Key words: titanium alloy; ZTA15; oxygen content; microstructure; mechanical property

钛及钛合金因具有低密度、高比强度、低热膨胀系数以及良好的耐高温性, 广泛应用航空、航天、武器装备等领域^[1-3]。ZTA15 钛合金是我国科学家在苏联的 BT-20 合金基础上经过成分改进而得, 其名义成分为 Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V, 是一种近 α 型钛合金, 同时具备 α 型和 $\alpha + \beta$ 型钛合金的优点, 与常用的 ZTC4 钛合金相比, ZTA15 钛合金具有与其相近的室温性能, 以及更优异的高温性能, 可在 450~500 °C 下长期使用。目前我国钛铸件产品种类中 ZTA15 钛合金使用量仅次于 ZTC4, 两者共占我国钛铸件生产总量的 80% 以上^[4]。

铸造钛合金的性能主要由合金成分和显微组织决定, 氧元素虽然是钛合金中的杂质元素, 但可以决定合金的微观形貌, 进而影响合金的力学性能。研究表明氧作为溶质可提高合金在凝固过程中的形核率, 起到细化晶粒, 提高合金强度的作用。Yan 等^[5] 综述了氧含量对 α -Ti 型、($\alpha + \beta$)-Ti 型以及 β -Ti 型合金延展性的影响, 认为氧含量对不同类型的钛合金影响程度不同, 增加氧含量导致 α 型钛合金的延展性下降趋势比 β 型钛合金明显, 这是因为随着氧含量的增加 β 型钛合金中脆性的 ω 相减少, 这使得 β 型钛合金性能并未出现明显的降低。梁超等^[6]、刘志成等^[7] 分别研究了不同氧含量对 TC4 钛合金性能及相变点的影响, 均得出了相似的结果, 氧含量的增加会对合金起到一定固溶强化的作用, 使 TC4 合金抗拉强度增加, 塑性及冲击韧性降低, 同时合金的相变点也随之升高, 氧含量每升高 0.01% (质量分数, 下同), 合金相变点 (($\alpha + \beta$)/ β 转变温度) 升高 3 °C 左右, 在锻造 TC4 钛合金氧含量控制在 0.165% 左右时, 合金具有最佳的力学性能。关于氧含量对 ZTA15 合金的影响研究相对较少, 贾志伟等^[8] 研究了 0.1% 和 0.12% 的氧含量对 ZTA15 钛合金在室温和高温下力学性能的影响, 在含量为 0.1% 时合金在室温和高温下均具有较高强度、塑性及冲击韧性, 当氧含量升至 0.12% 时, 合金的室温和高温抗拉强度分别提高了 27 MPa 和 40 MPa, 但断后伸长率降低了 3% 和 4.5%。

目前, 对于铸造钛合金的研究主要集中在热处理工艺、元素成分调控以及通过添加其他元素来使合金满足某些特殊要求方面^[9-11]。本工作为丰富氧元素对 ZTA15 钛合金的影响, 通过悬浮熔炼工艺系统研究氧含量对 ZTA15 钛合金组织及性能影响, 为铸造 ZTA15 钛合金的性能调控提供一定的数据参考。

1 实验材料及方法

本实验确定的 ZTA15 钛合金主合金元素化学成分名义配比为 Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V, 选用真空感应悬浮熔炼工艺, 其中保持 Al、V、Zr、Mo 主元素含量不变, 通过添加不同含量的 TiO₂, 控制合金中氧的质量分数为 0.08%、0.12%、0.16% 及 0.20%, 分别对应合金编号为 ZTA15-0.08O、ZTA15-0.12O、ZTA15-0.16O 及 ZTA15-0.20O。选用真空感应悬浮熔炼设备进行熔炼, 由于该工艺真空度最高可以达到 10⁻³ Pa 级别, 对于钛合金来说, 这种设备的高真空性可以保证钛合金具有很高的纯净度。通过静浇工艺浇铸出规格为 $\phi 50 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的铸锭, 经热等静压后在铸锭上中下三部位分别取样进行化学成分检测, 以减小成分偏析对结果造成的影响, 其中氧含量检测采用氮氢氧分析仪器进行检测, 样品尺寸为 $\phi 2 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, 测试前用砂纸将样品表皮氧化层打磨干净, 避免氧化层的存在对合金氧含量的影响。使用线切割方法在铸锭上切取尺寸为 10 mm \times 10 mm \times 5 mm 试样, 对其进行打磨抛光处理, 使用 Zeiss Axio Observer 金相显微镜和日立 S-4300N 扫描电子显微镜对试块进行微观形貌观察, 使用 SHIMADZU XRD-7000X 型 X 射线衍射仪对试样进行物相分析。最后依据 GB/T 228.1—2010 进行室温力学性能测试, 并对拉伸断口形貌进行观察。TA15 铸锭实际化学成分检测结果见表 1。

表 1 ZTA15 钛合金的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of ZTA15 titanium alloy (mass fraction/%)

Sample	Al	V	Zr	Mo	O	Ti
ZTA15-0.08O	6.66	2.16	2.12	1.78	0.083	Bal.
ZTA15-0.12O	6.68	2.22	2.14	1.74	0.110	Bal.
ZTA15-0.16O	6.45	2.28	2.22	1.68	0.160	Bal.
ZTA15-0.20O	6.37	2.24	2.16	1.70	0.220	Bal.

2 结果与分析

2.1 氧含量对合金显微组织的影响

图 1 分别为不同氧含量的 ZTA15 钛合金经热等静压后的金相组织。4 种 ZTA15 钛合金为典型的魏氏组织, 粗大的原始 β 晶粒清晰可见, 氧含量较低时, 如图 1(a)、(b) 所示, 晶界上有非常明显的

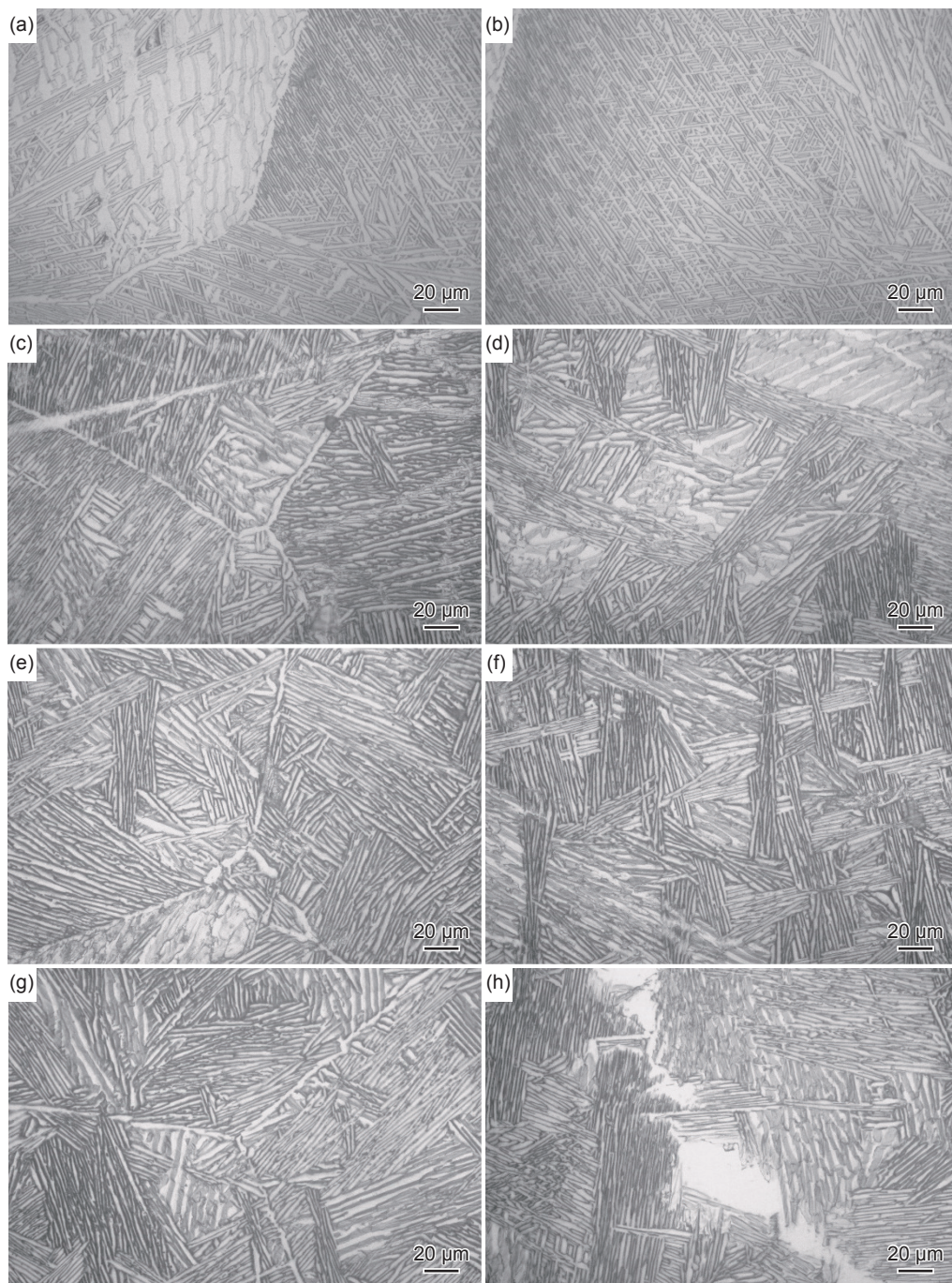


图1 不同氧含量 ZTA15 合金金相组织 (a)ZTA15-0.08O 晶界;(b)ZTA15-0.08O 晶内;(c)ZTA15-0.12O 晶界;(d)ZTA15-0.12O 晶内组织;(e)ZTA15-0.16O 晶界;(f)ZTA15-0.16O 晶内;(g)ZTA15-0.20O 晶界;(h)ZTA15-0.20O 晶内

Fig. 1 Metallography of ZTA15 alloys with different oxygen content (a)ZTA15-0.08O grain boundary; (b)ZTA15-0.08O grain internal; (c)ZTA15-0.12O grain boundary; (d)ZTA15-0.12O grain internal; (e)ZTA15-0.16O grain boundary; (f)ZTA15-0.16O grain internal; (g)ZTA15-0.20O grain boundary; (h)ZTA15-0.20O grain internal

连续 α 相, 晶界 α 片平直且粗大, 晶内为丛林状的 α 片状组织呈规则平行排列, 晶内片间为 β 相与厚片状的 α 相形成一个平行排列的集束状形貌。当氧含量增加到 0.12% 时, 如图 1(c)、(d) 所示, 晶界 α 片连续性变差, 长度减小, 晶内大小不一的集束状组织呈随机分布, 同时集束状组织的长度变

短, 宽度变窄, 方向变得混乱, 部分区域片间的 β 相减少, 使晶内的 α 相呈现出不规则的组织形状。当氧含量进一步增加到 0.16% 和 0.2% 时, 如图 1(e)、(g) 所示, 针状 α 相沿着晶界析出, 晶界 α 片与晶内组织形貌相近, 晶界开始变得模糊不清, 局部区域呈现出两者融为一体或晶界被晶内集束刺穿的组

织结构特点。当氧含量为 0.2% 时, 如图 1(h) 所示, 晶内消失的 β 相区域进一步扩大, 出现了粗大的不规则状 α 相且连续分布, 其最大尺寸超过了 40 μm 。

图 2 是不同氧含量 ZTA15 合金的 SEM 照片。从图中可以看出, 初始的 ZTA15-0.08O 合金, β 线条状规则排列, 当氧含量为 0.16 时, α 相含量明显增加, 沿着晶界呈鱼鳞状分布, 当氧含量继续提高到 0.2% 时, α 相进一步析出, 形状由鱼鳞状转变为长条状及片状聚集分布, 其尺寸也进一步加大, 这与其对应的金相组织一致。对不同氧含量合

金的 α 相板条宽度进行测量, 每种合金随机选取 5 个位置, 测量结果见表 2。经计算得出 4 种不同氧含量合金的 α 相板条平均宽度分别为 3.92、3.06、2.49、2.77 μm , 当氧含量为 0.16% 时, 板条宽度最小。图 3 为不同氧含量 ZTA15 合金 XRD 分析, 4 种不同氧含量合金 XRD 衍射谱中只有两种衍射峰, 分别代表 α 相和 β 相, 也就是说 ZTA15 合金中没有金属氧化物析出, 说明合金中氧的含量没有超过最大固溶度, 但随着氧含量的增加, α 相衍射峰数量明显增加, 表明 α 相含量有所增加。

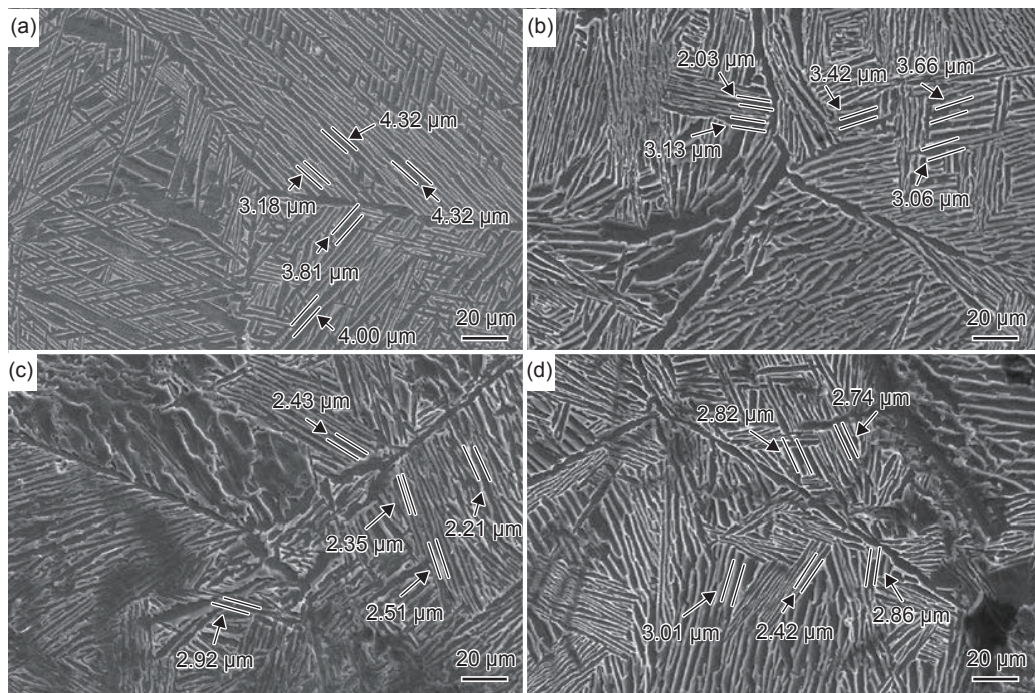


图 2 不同氧含量 ZTA15 合金 SEM 形貌 (a)ZTA15-0.08O; (b)ZTA15-0.12O; (c)ZTA15-0.16O; (d)ZTA15-0.20O

Fig. 2 SEM of ZTA15 alloy with different oxygen content (a)ZTA15-0.08O; (b)ZTA15-0.12O; (c)ZTA15-0.16O; (d)ZTA15-0.20O

2.2 氧含量对合金拉伸性能的影响

图 4 为不同氧含量的 ZTA15 合金力学性能变化情况, 从图中可以看出, 随着氧含量的增加, 合金抗拉强度和屈服强度呈先升高后降低的变化趋势。

表 2 不同氧含量下 ZTA15 合金 α 相板条宽度
Table 2 Width size of ZTA15 alloy α -phase strip under different oxygen content

Sample	Width/ μm					Average
	1	2	3	4	5	
ZTA15-0.08O	4.32	3.18	4.32	4.00	3.81	3.92
ZTA15-0.12O	2.03	3.13	3.66	3.42	3.06	3.06
ZTA15-0.16O	2.43	2.21	2.35	2.51	2.92	2.49
ZTA15-0.20O	2.42	3.01	2.86	2.82	2.74	2.77

当氧含量为 0.08% 时, 合金的抗拉强度和屈服强度分别为 855 MPa 和 738 MPa; 当氧含量由 0.08% 升

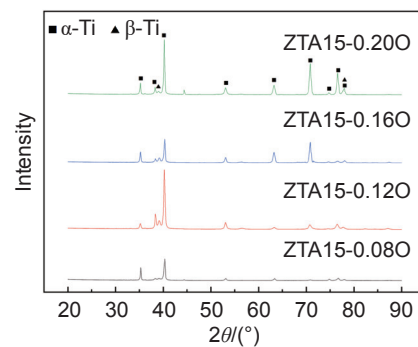


图 3 不同氧含量 ZTA15 钛合金 XRD

Fig. 3 XRD of ZTA15 titanium alloy with different oxygen content

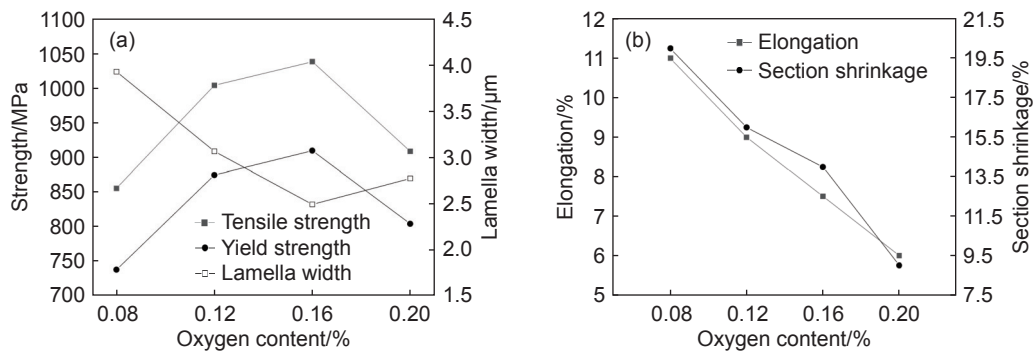


图4 不同氧含量 ZTA15 合金拉伸性能 (a)抗拉强度及屈服强度; (b)断后伸长率及断面收缩率

Fig. 4 Tensile properties of ZTA15 alloy with different oxygen content (a)tensile strength and yield strength; (b)elongation and section shrinkage

至 0.16% 时合金抗拉强度和屈服强度分别增加了 182 MPa 和 171 MPa; 当氧含量升至 0.2% 时, 抗拉强度和屈服强度仅为 908 MPa 和 804 MPa, 降低明显。ZTA15 合金塑性随着氧含量的提高逐渐降低, 在 0.08% 时断后伸长率最高为 11%, 氧含量为 0.2% 时断后伸长率最低仅为 6%, 同样断面收缩率也从 20% 降至 9%。

图 5 为不同氧含量断口宏观及微观照片。4 种合金拉伸试样受轴向应力作用断裂前均发生明显的缩颈, 拉伸断口显微组织均为塑性断裂。其中氧含量为 0.08% (图 5(a)) 时, 试样宏观断口较为规则, 中间纤维区明显, 其对应的显微结构韧窝数量最多且相对较深, 此时合金塑性最好, 主要是因为

其对应的金相组织相对均匀, 晶内的集束均匀分布, 晶界上无较多的 α 相析出。图 5(c)、(d) 为 0.12% 氧含量的断口照片, 可以看出 0.12% 氧含量中心分布着大量较深的韧窝及凹坑, 这也是属于典型的塑性断裂形貌, 但其宏观图中断口边缘较为平齐, 光亮, 这是试样塑性降低的现象。当氧含量为 0.16% 时, 其微观形貌中仍可发现少量的韧窝组织, 同时也出现了具有“解离台阶”和“河流”花样的典型准解理特征, 解理面的存在使合金在拉伸时优先在此处开裂, 这主要与 0.16% 氧含量时晶界处开始析出的针状 α 相有关。当氧含量为 0.2% 时, 宏观断口形貌较为平直, 韧窝组织深度较浅, 表明此时合金塑性最低。

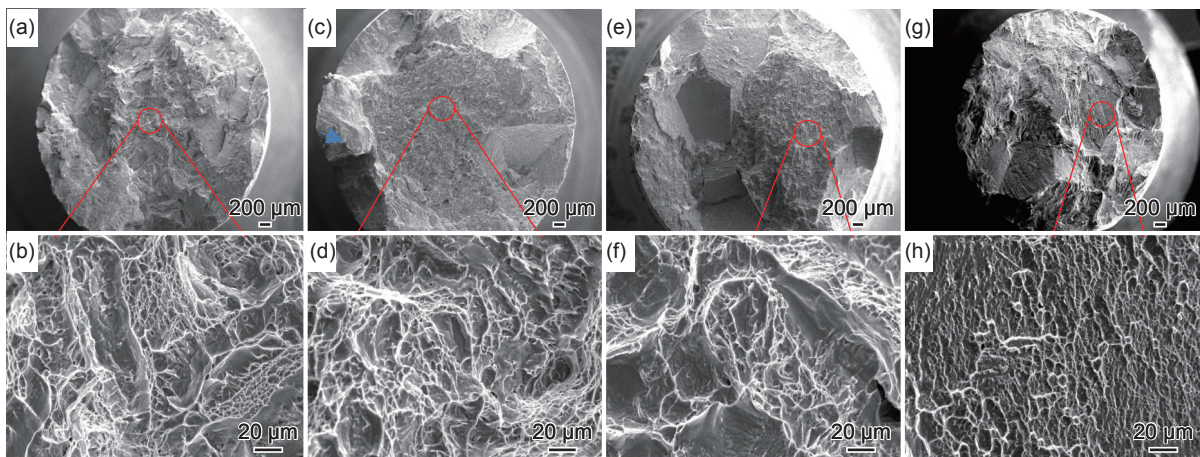


图5 不同氧含量 ZTA15 合金拉伸断口 (a)、(b)ZTA15-0.08O; (c)、(d)ZTA15-0.12O; (e)、(f)ZTA15-0.16O; (g)、(h)ZTA15-0.20O

Fig. 5 Tensile fracture of ZTA15 alloy with different oxygen content (a), (b)ZTA15-0.08O; (c), (d)ZTA15-0.12O; (e), (f)ZTA15-0.16O; (g), (h)ZTA15-0.20O

2.3 分析与讨论

氧是影响钛合金组织和性能最为显著的一种杂质元素, 其对钛合金的主要有 4 方面影响^[4,12-14]。(a)促进 α 相从 β 相中析出。氧元素作为稳定元素

可以提高 $(\alpha+\beta)/\beta$ 转变温度, 提高氧含量可以提高合金相转变温度, 提高 α 相含量, 而析出的 α 相则倾向于在晶界处以针状组织存在, 这些针状组织可以削弱晶界或导致沿优先方向过早断裂, 从而降低

合金延展性。(b)诱导马氏体相变。与 β 相变相似,马氏体相变温度随氧气的增加而升高,高氧含量可以促进马氏体相 α' 、 α'' 的析出,通常认为这些相对合金有强化作用,但也伴随塑性降低。(c)稳定 α 相。可减少钛合金中有脆性作用的 ω 和 α_2 相的析出。(d)诱导形成氧团簇。增加氧含量可以在 α 基体中形成 Ti_3Al 纳米团簇。上述后两种作用效果主要体现在 β 型钛合金中,而本研究的 ZTA15 合金为近 α 型钛合金,因此仅表现出对 α 相相关的组织及性能的影响。

除此之外,由于氧和钛具有很强的亲和力且氧的原子半径远小于钛的原子半径,钛合金中的氧原子常常作为间隙原子固溶到钛合金 α 相中,形成间隙固溶体,随着氧含量的增加,间隙氧原子不断融入加剧了晶格畸变,使钛合金强度逐渐提高^[7, 15]。同时氧元素作为间隙元素,在溶入合金基体后,基体晶格内部弹性应力场改变,弹性应力场与位错有交互作用而偏聚于位错线附近形成 Cottrell 气团,导致合金塑性降低^[6]。

在本研究中氧含量的增加改变了晶内 α 集束的大小和排列方式,使其从均匀的同向分布改变为随机的异向分布状态,合金强度因此得到提高。同时,氧含量的增加还降低了晶内板条宽度,宽度变化趋势与力学性能之间的关系如图 4(a)所示。根据 Hall-Petch 公式可知,晶粒尺寸越小合金强度越高,随着氧含量的增加,板条宽度减小,也进一步提高合金强度。合金塑性随氧含量增加而降低是因为氧元素的添加提高了 $(\alpha+\beta)/\beta$ 相转变温度,随着氧含量的增加,越来越多的针状 α 相沿着晶界析出,如当氧含量为 0.2% 时,晶内集束状组织刺穿晶界,晶粒内部形成聚集 α 相。同时,由于氧在钛合金中的溶解度较高,最高可达 14%^[16],易形成间隙固溶体,随着氧含量的增加,金属晶体晶格畸变程度不断增强,对在滑移面上运动着的位错阻碍作用增加,这也是合金强度增加塑性降低的原因之一^[17-18]。

3 结论

(1)4 种不同氧含量的 ZTA15 钛合金组织均为典型的魏氏组织,随着氧含量的增加晶界 α 片连续性减低,晶内集束组织的长度变短,宽度变窄,方向变得混乱,当氧含量为 0.16% 和 0.2% 时,晶界处析出的针状 α 相削弱了晶界,在晶粒内部出现了较大的聚集 α 相。

(2)随着氧含量的增加,4 种合金 α 板条平均宽度为 3.92、3.06、2.49、2.77 μm 。氧含量为 0.16% 时,合金组织明显细化,此时 α 相含量明显增加,沿着晶界呈鱼鳞状分布,当氧含量升至 0.2% 时, α 相进一步析出且转变为片状聚集分布。

(3)随着氧含量增加,ZTA15 钛合金抗拉强度和屈服强度呈先升高后降低的变化趋势,合金断后伸长率从 11% 降至 6%。当氧含量为 0.16% 时,合金的屈服强度和抗拉强度最高,分别为 1037 MPa 和 909 MPa,断后伸长率及断面收缩率为 7.5% 和 14%。当氧含量为 0.2% 时,断口韧窝组织深度较浅,此时合金塑性最低。

参考文献:

- [1] 刘世锋,宋玺,薛彤,等.钛合金及钛基复合材料在航空航天中的应用和发展[J].航空材料学报,2020,40(3):77-94.
LIU S F, SONG X, XUE T, et al. Application and development of titanium alloy and titanium matrix composites in aerospace field[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40(3): 77-94.
- [2] 郭鲤,何伟霞,周鹏.我国钛及钛合金产品的研究现状及发展前景[J].热加工工艺,2020,49(22):22-28.
GUO L, HE W X, ZHOU P. Research status and development prospect of titanium and titanium alloy products in China[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(22): 22-28.
- [3] 蔡建明,弭光宝,高帆,等.航空发动机用先进高温钛合金材料技术研究与发展[J].材料工程,2016,44(8):1-10.
CAI J M, MI G B, GAO F, et al. Research and development of some advanced high temperature titanium alloys for aero-engine[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(8): 1-10.
- [4] 张美娟,南海,鞠忠强,等.航空铸造钛合金及其成型技术发展[J].航空材料学报,2016,36(3):13-19.
ZHANG M J, NAN H, JU Z Q, et al. Aeronautical cast Ti alloy and forming technology development[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(3): 13-19.
- [5] YAN M, XU W, DARGUSCH M S, et al. Review of effect of oxygen on room temperature ductility of titanium and titanium alloys[J]. Powder Metallurgy, 2014, 57(4): 251-257.
- [6] 梁超,刘文彬,王铁军,等.氧含量对热等静压 TC4 钛合金力学性能的影响[J].粉末冶金工业,2019,29(5):12-17.
LIANG C, LIU W B, WANG T J, et al. Effect of oxygen content on mechanical properties of hot isostatic pressing

- TC4 titanium alloy[J]. *Power Metallurgy Industry*, 2019, 29(5): 12-17.
- [7] 刘志成, 张利军, 张晨辉. 氧含量对 TC4 钛合金力学性能的影响[J]. *世界有色金属*, 2016(8): 151-153.
LIU Z C, ZHANG L J, ZHANG C H. Effect of oxygen content on the mechanical properties of TC4 titanium alloy[J]. *World Nonferrous Metals*, 2016(8): 151-153.
- [8] 贾志伟, 冯芝华, 纪志军, 等. 氧含量对 ZTA15 钛合金显微组织和性能的影响[J]. *新技术新工艺*, 2021(9): 76-80.
JIA Z W, FENG Z H, JI Z J, et al. Effect of oxygen content on microstructure and properties of ZTA15 titanium alloy[J]. *New Technology & New Process*, 2021(9): 76-80.
- [9] 李好峰, 车立达, 冯佳奇, 等. 热等静压对 ZTA15 钛合金组织及性能的影响分析[J]. *物理测试*, 2024, 42(2): 1-6.
LI H F, CHE L D, FENG J Q, et al. Effect analysis of hot isostatic pressing on microstructure and properties of ZTA15 titanium alloy[J]. *Physisc Examination and Testing*, 2024, 42(2): 1-6.
- [10] HUANG S, ZHAO Q, LIN C, et al. Effects of oxygen content on Charpy impact properties and crack resistance of α titanium alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 818(5): 1-16.
- [11] 隋楠, 曹京霞, 黄旭, 等. 合金成分对 TA15 钛合金组织及力学性能的影响[J]. *航空材料学报*, 2019, 39(1): 48-54.
SUI N, CAO J X, HUANG X, et al. Effect of composition on microstructure and mechanical properties of TA15 titanium alloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2019, 39(1): 48-54.
- [12] HUANG A J, LI G P, HAO Y L, et al. Acicular α_2 precipitation induced by capillarity at α/β phase boundaries in Ti-14Al-2Zr-3Sn-3Mo-0.5Si titanium alloy[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(16): 4939-4952.
- [13] HENNIG R G, TRINKLE D R, BOUCHET J, et al. Impurities block the α to ω martensitic transformation in titanium[J]. *Nature Materials*, 2005, 4(2): 129-133.
- [14] LI Q, LIU Y, YU H, et al. Effect of O addition on microstructure and mechanical properties of Ti-Nb alloys with various β stability[J]. *Vacuum*, 2023, 215(3): 1-7.
- [15] 沈睿, 陈锋, 余新泉, 等. 氧含量对 Ti-35Nb-3.7Zr-1.3Mo-xO 合金组织与力学性能的影响[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2015, 45(3): 478-483.
SHEN R, CHEN F, YU X Q, et al. Influence of oxygen content on microstructure and mechanical properties of Ti-35Nb-3.7Zr-1.3Mo-xO alloys[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2015, 45(3): 478-483.
- [16] MURRAY J L, WRIEDT H A. The O-Ti (oxygen-titanium) system[J]. *Journal of Phase Equilibria*, 1987, 8(2): 148-165.
- [17] LU J, GE P, ZHAO Y. Recent development of effect mechanism of alloying elements in titanium alloy design[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2014, 43(4): 775-779.
- [18] SONIA B, JAROSLAV M, PATRIK P. The effect of oxygen addition on microstructure and mechanical properties of various beta-titanium alloys[J]. *JOM*, 2020, 72(4): 1656-1663.

收稿日期: 2024-05-14; 录用日期: 2024-07-26

通讯作者: 刘天翼(1995—), 男, 硕士, 研究方向为钛合金铸造技术, 联系地址: 辽宁省沈阳市铁西区云峰南街 17 号(110022), E-mail: liutianyi0513@163.com

(本文责编: 王俊丽)