

Ta 含量对 Ti48Al2Cr2Nb 合金组织与力学性能的影响

张新房^{1, 2}, 李广垠¹, 陈占兴^{1, 2}, 邢秋玮^{1, 2}, 方虹泽³, 陈瑞润³

(1. 郑州航空工业管理学院材料学院, 河南郑州 450046;

2. 航空高性能材料制备及检测河南省协同创新中心, 河南郑州 450046;

3. 哈尔滨工业大学郑州高等研究院, 先进材料智能热加工技术研究所, 河南郑州 450000)

摘要: 采用真空非自耗电弧熔炼炉制备了Ti48Al2Cr2Nb_xTa ($x=0, 1, 2, 4$, 原子分数/%) 合金, 研究了Ta含量对合金微观组织演化和力学性能的影响。结果表明, 未添加Ta时合金为粗大片层组织, 随Ta含量增加, 组织逐步细化、析出相更为致密。合金相组成主要为 γ -TiAl相与 α_2 -Ti₃Al相, Ta含量为2%时析出相显著增多, 合金组织呈清晰网状与胞状结构, 组织均匀性最佳。随Ta含量增加, 合金硬度呈现先增大后减小再增大的趋势, 2%Ta合金的硬度较低, 室温与高温抗压强度、塑性最优。各合金室温压缩时均为脆性断裂模式, 其中2%Ta合金抗裂纹扩展能力更强。

关键词: TiAl合金; Ta合金化; 微观组织; 力学性能; 真空电弧熔炼; 铸造合金

中图分类号: TG146.2⁺3; TG249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 07-0779-07

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0099

The Effect of Ta Content on the Microstructure and Mechanical Properties of Ti48Al2Cr2Nb Alloy

ZHANG Xin-fang^{1, 2}, LI Guang-yin¹, CHEN Zhan-xing^{1, 2},
XING Qiu-wei^{1, 2}, FANG Hong-ze³, CHEN Rui-run³

(1. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, Henan, China;

2. Henan Collaborative Innovation Center for Preparation and Detection of High-Performance Aerospace Materials, Zhengzhou 450046, Henan, China; 3. Institute of Intelligent Thermal Processing Technology for Advanced Materials, Zhengzhou Advanced Research Institute of Harbin Institute of Technology, Zhengzhou 450000, Henan, China)

Abstract: Ti48Al2Cr2Nb_xTa ($x=0, 1, 2, 4$, atomic fraction/%) alloys were prepared by vacuum non-consumable arc melting, and the influence of Ta content on microstructural evolution and mechanical properties of the alloys was investigated. The results show that the alloy without Ta exhibits a coarse lamellar microstructure. As the Ta content increases, the microstructure is gradually refined and the precipitated phases become denser. The as-cast alloys are primarily composed of γ -TiAl and α_2 -Ti₃Al phases. When the Ta content is 2%, the precipitated phases increase significantly, and the alloy shows a clear network and cellular structure with the best uniformity. With the increase of Ta content, the alloy hardness follows a trend of first increasing, then decreasing, and finally increasing. The 2%Ta alloy has a lower hardness and the highest compressive strength and ductility at both room and high temperatures. All alloys show brittle fracture at room temperature compression, and the 2%Ta alloy exhibits superior crack propagation resistance.

Key words: TiAl alloy; Ta alloying; microstructure; mechanical property; vacuum arc melting; cast alloy

全球新一轮产业升级推动了航空航天动力系统零部件对轻质耐热新型结构材料的迫切需求, γ -TiAl合金具有低密度 (约3.8~4.3 g·cm⁻³)、高比强度以及良好的高温抗蠕变性能等优点, 已逐渐成为高温部件中

替代镍基高温合金从而实现大幅度减重的候选材料^[1-2]。然而, 常见的铸态 γ -TiAl合金通常为不均匀的粗大片层团组织, 受金属间化合物本征脆性影响, 其室温塑性较低, 严重制约了该类合金的广泛工业化应用^[3]。

基金项目: 河南省重点研发专项 (No. 251111231400); 河南省自然科学基金 (No. 252300420066); 河南省国际科技合作项目 (No. 252102520046); 郑州航院研究生创新计划 (No. 2026cx201)。

收稿日期: 2025-09-09 收到初稿, 2026-01-22 收到修订稿。

作者简介: 张新房 (1978-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为 Ti 及 TiAl 合金凝固。E-mail: teaoren@163.com

通信作者: 陈占兴, 男, 博士, 副教授。电话: 0371-61912902, E-mail: zxchen_hit@zua.edu.cn

引用格式: 张新房, 李广垠, 陈占兴, 等. Ta 含量对 Ti48Al2Cr2Nb 合金组织与力学性能的影响 [J]. 铸造, 2026, 75 (7): 779-785.
Zhang Xinfang, Li Guangyin, Chen Zhanxing, et al. The effect of Ta content on the microstructure and mechanical properties of Ti48Al2Cr2Nb alloy [J]. Foundry, 2026, 75 (7): 779-785.

γ -TiAl基合金的力学性能对成分和组织具有较强的依赖性, 为了进一步改善其力学性能^[4-6], 具有特殊晶体结构的块状组织 (γ_m 相) 在合金改性方面引起了极大的关注^[7-9]。

研究发现, 无论 γ 相以何种方式形核, 其后续生长均为沿着 γ_m 相的 γ 密排面^[8]不断形核长大的过程, 因此每一个 γ_m 区域会被分割成晶粒尺寸细小的亚晶粒^[10]。这些亚晶粒为提高TiAl合金力学性能及改善其室温塑性提供了可能^[11]。为了拓宽 γ_m 相的析出温度, 人们通常在 γ -TiAl合金中添加Ta元素^[6, 12], Ta作为慢速扩散元素, 可以增加冷却速率范围^[13]。但是, 过量Ta元素会增大铸锭组织的偏析程度, 从而增加铸锭开裂倾向, 使得合金制备成本过高。研究表明, 在 γ -TiAl合金中加入适量Ta元素可改善其综合性能, 合金元素的加入呈现“少量多元”的趋势^[14]。

尽管目前已明确Ta元素在拓宽 γ_m 相析出温度、细化晶粒及提升合金性能方面的积极作用, 但关于Ta含量对铸造TiAl合金 γ_m 相析出行为的定量影响规律尚未形成系统认知, Ta元素调控 γ_m 相形核与生长的微观机制仍不清晰, 且Ta的具体含量区间及对应组织-性能协同优化的内在逻辑缺乏深入探究, 这极大限制了高性能TiAl合金的精准设计与工业化应用。因此, 本课题通过真空非自耗电弧熔炼制备不同Ta含量的Ti48Al2Cr2Nb合金, 系统研究Ta含量对 γ_m 相析出行为、微观组织演化及力学性能的影响, 揭示Ta元素作用下 γ_m 相的形核及生长机制, 明确组织与性能协同优化的最佳Ta添加量, 为开发和设计适于高温下工业化应用的铸造 γ -TiAl合金提供理论依据与技术支撑。

1 试验材料及方法

试验材料为海绵钛、铝粒、钽粒、铌粒和铬粒, 纯度均为99.98%。使用真空非自耗电弧熔炼炉熔炼合金, 随炉冷却至室温, 制备得到Ti48Al2Cr2Nb_xTa ($x=0, 1, 2, 4$, 原子分数/%) 合金纽扣锭, 锭的质量约50 g, 半径为20 mm, 高度为12 mm。由于Al元素的熔点较低, 在熔炼时会产生损耗, 因此试验原料的Al含量比名义成分多2%。

采用线切割机从纽扣锭切取 $\Phi 3\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的压缩试样和 $15\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的片状试样。对片状试样进行研磨和机械抛光后, 在Keller溶液 ($2.5\%\text{HNO}_3+1\%\text{HF}+1.5\%\text{HCl}+95\%\text{H}_2\text{O}$, 体积分数) 中腐蚀10 s, 利用光学显微镜 (OM) 观察其金相组织。利用配备EDS系统的FEI Scios Dual Beam型扫描电子显微镜 (SEM) 观察试样微观结构和晶体学取向; 通过XRD分析合金的物相组成。采用HV-100型维氏硬

度计对试样进行硬度测试, 选取不同区域进行多次测量, 并对数据求取平均值。室温和高温压缩性能测试时, 每组成分合金分别进行3次平行试验, 测试结果取平均值。室温压缩测试在MTS液压万能试验机上进行, 将圆柱试样上下底面打磨平整后置于试验机工作台上, 压缩速率为 10^{-3} s^{-1} 。高温压缩试验在岛津AG-I250 kN精密万能材料试验机上进行, 试样压缩前需要升温至745 $^{\circ}\text{C}$ 并保温10 min, 压缩速率为 10^{-3} s^{-1} 。

2 试验结果与分析

2.1 微观组织

以往研究表明, Ta作为 β 相稳定元素容易富集在树枝状 β 组织的枝晶干内, 而在残余液相中较少^[15]。析出相形成后, 一部分会成为异质核心, 起到降低形核功的作用, 而另一部分在合金的凝固过程中, 会阻止晶粒的继续长大, 细化层片组织, 增加层片的形核位置^[14]。

不同Ta含量下Ti48Al2Cr2Nb合金的金相组织如图1所示。未添加Ta时合金组织呈现不均匀性, 可见明显的不规则块状、片状混合形貌, 以及较多形态杂乱的区域, 片层或相的排列缺乏规整性。这是由于未添加Ta时, 合金凝固及相变过程中相的形核、长大未得到有效调控, 组织中 γ -TiAl相、 α_2 -Ti₃Al等分布较随机, 故存在粗大且形态各异的组织单元, 这类组织可能使合金力学性能离散性增大, 如造成强度、韧性的局部差异。添加1%Ta后, 组织有序性提升, 片层状结构开始显现更明显的方向性, 杂乱区域减少, 相比未添加Ta的合金, 相的排列趋向规则化, 说明Ta元素初步影响了相变动力学^[16], 促使 γ/α_2 片层在生长过程中更易沿特定方向发展, 抑制了过度杂乱的组织形成。但仍有少量局部区域未完全规整, 表明1%Ta的调控作用尚不完全, 不过已开启组织向更均匀片层形态转变的趋势。随着Ta含量增至2%, 组织呈现出清晰的类网状和胞状结构, 片层状结构清晰且连续, 组织单元尺寸相比图1(b)更细密, 相的分布一致性更好, γ/α_2 片层的排列方向更统一, 组织的规律性和有序性达到较好水平, 说明Ta对相变的调控作用增强, 在凝固过程中, 促进了形核率提升或长大方向约束, 使组织细化且有序化程度加深。层片或网状组织可在一定程度上协同承受载荷, 所以这类组织有利于提升合金的强度与韧性^[17]。如图1(d)所示, 加入4%Ta后合金晶粒组织更加细化, 但相较于图1(c), 组织的规则性下降, 网状等有序结构开始变得模糊、粗化。部分区域出现组织团聚或异常长大的现象, 说明过高的Ta含量

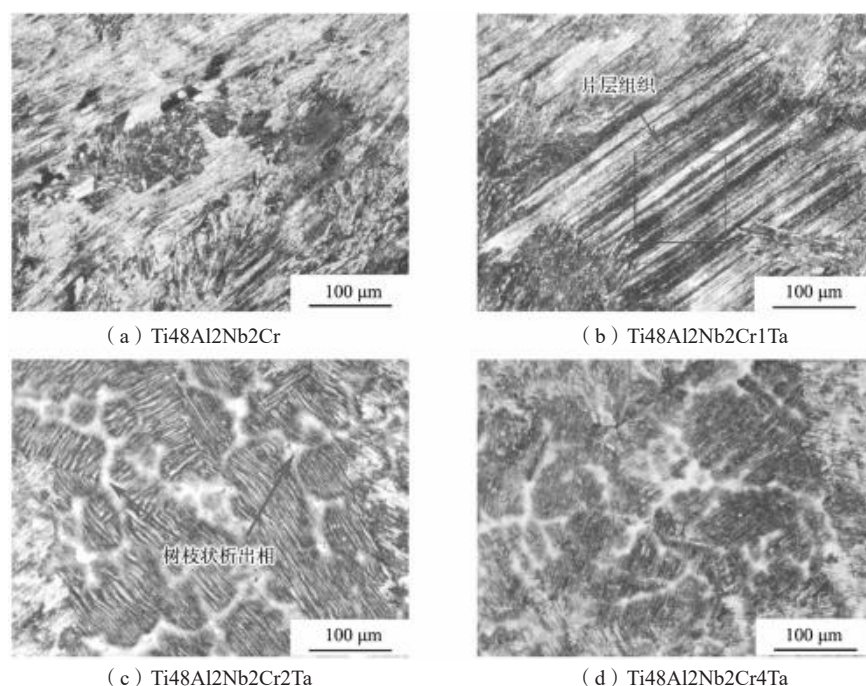


图1 Ti48Al2Cr2NbTa合金的金相组织

Fig. 1 Metallographic structures of the Ti48Al2Cr2NbTa alloys

打破了之前的组织平衡，Ta元素对相生长的引导从促进有序变为过度干预，导致相的生长不受控，原本规则的形态被破坏。根据霍尔-佩奇公式：

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

可推测，添加Ta元素后TiAl基合金的强度和硬度等力学性能会得到提高。

在Ta添加条件下，Ti48Al2Cr2Nb合金的组织演化本质上受控于 β 稳定元素引入后对凝固路径、元素再分配行为及固态相变动力学的耦合调控作用^[18]。结

合图2可知，随着Ta含量增加，合金组织经历了由非均匀初生组织向有序细化片层结构再向复杂多相组织的演化过程。未添加Ta时，合金凝固主要遵循典型的 $\beta \rightarrow \alpha \rightarrow (\alpha_2 + \gamma)$ 转变路径，但由于Nb、Cr等元素对 β 相稳定能力有限，凝固过程中成分过冷及溶质再分配不充分，导致形核位置随机且长大过程缺乏约束，从而在OM尺度上表现为不规则块状与片层混合组织，在SEM下则体现为局部片层存在但连续性与规整性不足。这表明体系在热力学上虽具备片层形成条

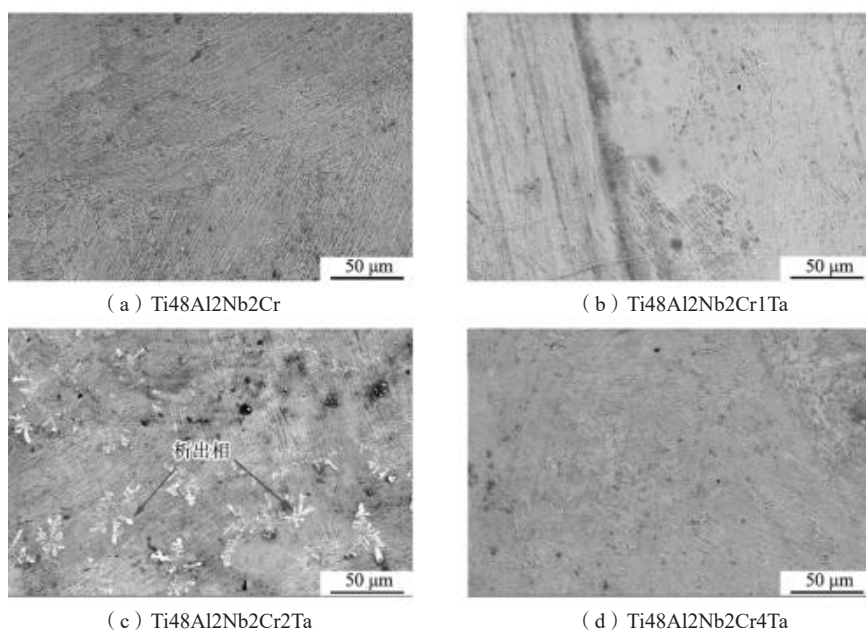


图2 Ti48Al2Cr2NbTa合金的SEM形貌

Fig. 2 SEM morphologies of the Ti48Al2Cr2NbTa alloys

件,但在动力学上缺乏有效控制机制,最终形成了不均匀的组织单元。当加入1%Ta后,由于Ta具有更强的 β 稳定能力,其在凝固过程中优先富集于枝晶干,改变了固液界面前沿的成分梯度,使得局部 β 相稳定区扩大。Ta的添加降低了 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变驱动力的局部波动;从动力学角度看,Ta的低扩散速率增强了溶质拖曳效应,降低了界面迁移速率。这一方面提高了异质形核概率,另一方面限制了晶粒的过度长大,使组织表现为片层取向趋于一致,均匀性提升,体系开始向受控片层组织演化。当Ta含量增加至2%时,其对凝固与相变路径的调控作用显著增强。较高含量Ta加剧了溶质偏析程度,使凝固过程中形成明显的成分起伏区,同时促进富Ta区域中第二相优先析出。局部成分波动使多相共存区间扩大,大量析出相作为异质形核核心显著提高形核率,同时通过Zener钉扎效应抑制晶界迁移,在SEM下表现为片层连续性被削弱并伴随大量颗粒状或块状第二相析出,形成典型的片层基体+弥散析出相复合组织。当Ta含量进一步增加至4%时,体系的组织演化机制发生转变。过量Ta导致严重的成分偏聚,使局部区域偏离原有相平衡路径,促进大量富Ta相的形成。高密度析出相对界面迁移产生过强阻碍,同时局部溶质富集引发不稳定生长行为。最终组织虽进一步细化但有序性下降,出现组织团聚及异常长大,均匀性显著降低。

2.2 能谱及X射线衍射分析

Ti48Al2Cr2Nb2Ta合金点扫描位置和能谱分析结果如图3和表1所示。可以看到,白色析出相(点1)的Ta含量明显高于非析出相区域(点2)。结合图4的XRD衍射谱分析可知,白色析出相为 α_2 -Ti₃Al,说明合金中添加2%Ta后发生了第二相析出行为。

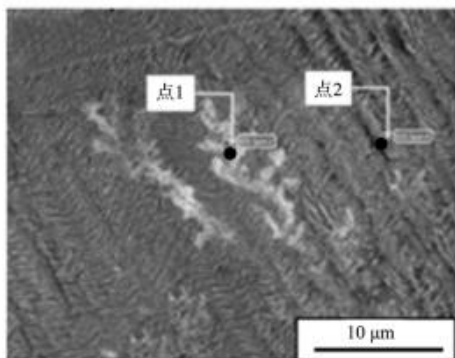


图3 Ti48Al2Cr2Nb2Ta合金的点扫描位置

Fig. 3 Point scan locations of the Ti48Al2Cr2Nb2Ta alloy

由图4可知,合金基本相组成为 γ -TiAl和 α_2 -Ti₃Al。Ti48Al2Cr2Nb、Ti48Al2Cr2Nb1Ta和Ti48Al2Cr2Nb4Ta中的 α_2 -Ti₃Al相很难被观察出来,而

表1 Ti48Al2Cr2Nb2Ta合金元素EDS分析结果
Tab. 1 EDS analysis results of elements in the Ti48Al2Cr2Nb2Ta alloy

扫描位置	原子分数/%				
	Ti	Al	Cr	Nb	Ta
点1	48.2	43.4	2.6	2.5	3.3
点2	49.5	44.5	2.0	2.8	1.2

Ti48Al2Cr2Nb2Ta中 γ -TiAl相和 α_2 -Ti₃Al相在 2θ 为65°和80°时衍射峰强度显著升高,且未检测到明显的 β /B₂相衍射峰。需要指出的是,Ta在 γ -TiAl合金体系中通常被认为具有 β 相稳定效应^[19],但其加入并不必然导致 β /B₂相在室温下保留。本研究中未检测到明显的 β 相衍射峰,表明Ta主要以固溶方式存在于 α / α_2 相中,其作用主要体现在改变相变动力学过程而非直接形成其他相。Ta的加入提高了 α 相向 γ 相转变所需的扩散阻力。由于 γ 相的形成需要明显的成分重新分布,而 $\alpha \rightarrow \alpha_2$ 有序化转变主要依赖短程有序过程^[20],在冷却过程中 α 相更容易发生有序化,形成 α_2 相,使得 α_2 相比例相对增加。因此,尽管Ta不属于传统意义上的 α 稳定元素,其对组织演化的影响仍然十分显著,主要通过调控 $\alpha \rightarrow \gamma$ 转变与 $\alpha \rightarrow \alpha_2$ 有序化之间的竞争关系来实现。

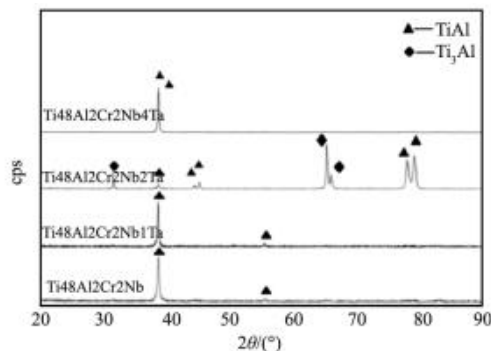


图4 Ti48Al2Cr2NbxTa合金的XRD衍射谱图

Fig. 4 XRD diffraction patterns of the Ti48Al2Cr2NbxTa alloys

2.3 力学性能分析

图5为不同Ta含量下Ti48Al2Cr2Nb合金的硬度变化曲线,可以看出,未添加Ta元素时合金硬度为HV307,添加Ta元素后合金硬度均明显提升。1%Ta含量下合金硬度为HV327,当Ta含量升至2%时硬度有所下降,而添加4%Ta后合金硬度最高,为HV353。Ta元素的加入细化了晶粒,增加了晶界数量,并且第二相析出阻碍了位错运动,因此合金硬度明显上升。Ti48Al2Cr2Nb2Ta合金硬度下降则是因为随Ta元素含量的增加,层片组织析出,合金中的硬脆相逐渐向软韧相转变^[21],晶格内的滑移系增多,韧性变好^[22]。随着

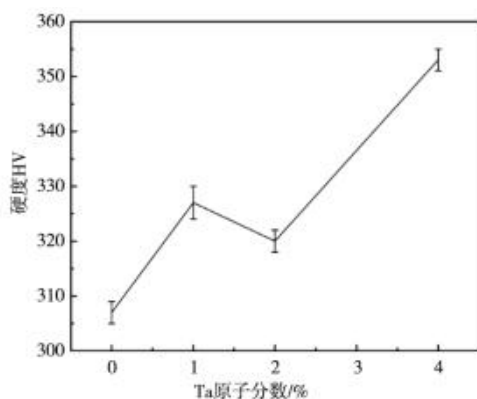


图5 不同Ta含量Ti48Al2Cr2Nb合金的硬度

Fig. 5 Hardnesses of the Ti48Al2Cr2Nb alloys with different Ta contents

Ta含量进一步增至4%，Ta元素弥散分布在合金的第二相基体中，起到弥散强化效果，此时硬脆相比较韧相多，造成硬度的进一步上升^[23]。

图6为不同Ta含量Ti48Al2Cr2Nb合金的室温压缩应力应变曲线。可以看出，在不同压缩程度下，各试样基本不发生塑性变形；加入Ta元素后合金压缩性能明显提升，Ta含量为2%时室温压缩性能最优，抗压强度为2 490 MPa，当Ta含量增至4%时，压缩性能又明显下降。加入Ta元素后，通过细晶强化与弥散强化两种路径，组织更加细化，同时晶界处有小部分Ta弥散分布在合金中，促进了片层组织形成，阻碍了裂纹扩散和位错的运动，进而提升了合金的强度和塑性，但Ta元素含量过高时增强相会聚集并长大，导致强度下降^[24-26]。

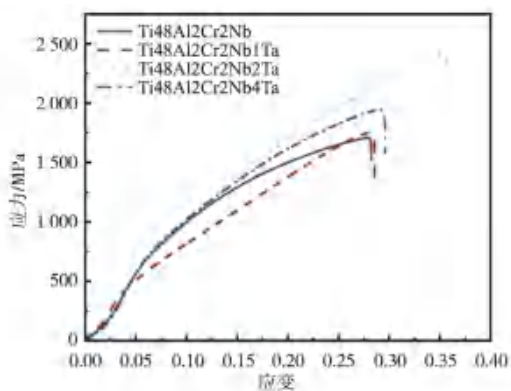


图6 室温下不同Ta含量Ti48Al2Cr2Nb合金的压缩应力应变曲线

Fig. 6 Compressive stress-strain curves of the Ti48Al2Cr2Nb alloys with different Ta contents at room temperature

合金化后的Ti48Al2Cr2Nb合金不仅要满足室温下应用场景的需求，还要达到高温高压服役性能要求^[26]，Ta对Ti48Al2Cr2Nb合金高温压缩性能的影响如图7所示，通过0.2%偏移应力（ $\sigma_{0.2}$ ）确定高温屈服强度（图中红色交点）。含2%Ta的合金具有最高屈服强度和抗压强度，高温抗变形能力最优。各试样高温压缩韧性较室温下有所提升，不容易发生脆性断裂。

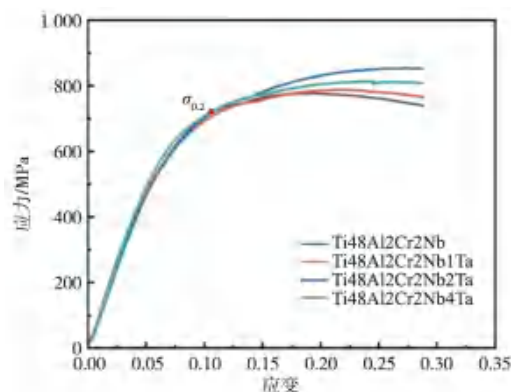


图7 745 °C下不同Ta含量Ti48Al2Cr2Nb合金的压缩应力应变曲线

Fig. 7 Compressive stress-strain curves of the Ti48Al2Cr2Nb alloys with different Ta contents at 745 °C

结合微观组织分析可知，随着Ta含量的增加，片层组织逐渐细化，晶界处失稳程度和晶胞区域面积增加，并且析出相在高温时会阻碍其他相的生长从而达到细化晶粒的效果^[27]。Ta含量高的相通常硬度和强度较高，与基体Ti48Al2Cr2Nb合金相比属于硬质相。当合金受力发生变形时，位错在基体中运动，遇到该析出相时会受到阻碍。根据位错绕过机制，析出相颗粒增加了位错运动的阻力，使得合金的强度得到提升。这种强化效果在室温和中高温条件下都能发挥作用。另外，在高温条件下，Ta的加入能提高合金的抗蠕变性能，其通过抑制位错的攀移和交滑移，从而减缓高温下的变形速率^[28]。除了在析出相中富集，少量Ta也会固溶在基体中。Ta与Ti、Al等原子的半径存在差异，这将引起基体晶格畸变，从而阻碍位错的运动，产生固溶强化效果，进一步提高合金的强度^[29]。

2.4 断口形貌分析

图8为不同Ta含量下Ti48Al2Cr2Nb合金的室温压缩断口形貌。分析可知合金断裂方式基本为脆性断裂。未添加Ta的合金断口呈现典型的细密层片状纹理，层片排列具有一定规整性，虽存在小幅起伏，但整体为TiAl合金 α_2/γ 层片状组织特征^[30]，失效形式以层片间和层片内断裂为主^[31]，属于韧性-脆性混合失效模式，这是TiAl合金层状组织的典型失效表现。层片状组织断裂时，裂纹既会沿结合相对弱的层片界面扩展，也会穿过层片，由于层片细密，裂纹扩展路径曲折，可吸收一定能量，但TiAl合金作为金属间化合物本身塑性有限^[32]，整体失效仍偏脆性。

添加1%Ta的合金断口仍呈现层片状纹理，以层片间和层片内断裂为主要失效形式，维持韧性-脆性混合失效特征，虽然层片连续性有变化，但未改变层片主导的断裂机制。当Ta含量达到2%时，断口形貌发生显著改变，层片状纹理大幅减少，出现较多相对平滑的

类解理或沿晶特征区域,可以观察到清晰的晶粒边界轮廓。Ta元素能促使合金组织从层片状向近等轴晶或块状组织转变^[33],改变相的组成与分布,抑制层片组织形成,促进 γ_m 和 α_2 相等组织形态的发展,使层片断裂特征弱化,新组织形态特征开始凸显。此时失效形式转变为以沿晶断裂或类解理断裂为主。组织形态改变后,层片约束作用消失, γ_m 相边界成为薄弱区域,裂纹优先沿晶界扩展导致沿晶断裂,或在晶粒内形成解理面,断裂过程中能量吸收极少,失效过程更脆^[34],

层片断裂主导的模式被新组织形态下的脆性断裂模式取代。当Ta含量为4%时,断口呈现层片状与块状组织混合的纹理^[35],层片区域较图8(a)、(b)更为粗化且不连续,块状区域存在明显的裂纹扩展路径。因组织不均匀,层片区域裂纹沿层片扩展,富Ta相、粗化相区域裂纹沿相界或穿过硬脆相扩展,多种断裂机制叠加,硬脆相的存在使裂纹易萌生和扩展,尽管有层片断裂的能量吸收,但整体失效过程脆性特征突出,体现高Ta含量下组织不均匀引发的复杂失效行为。

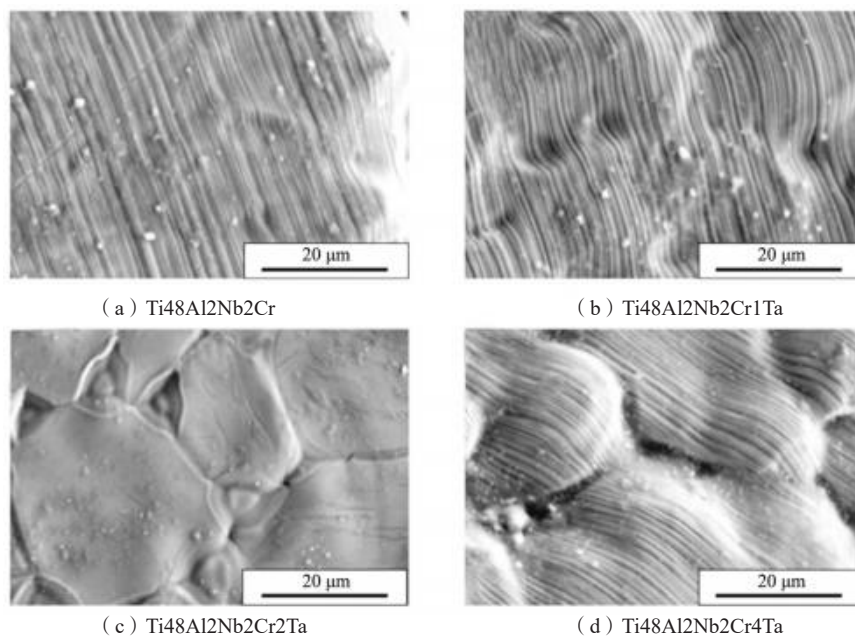


图8 Ti48Al2Cr2Nb x Ta合金室温压缩断口形貌

Fig. 8 Compression fracture morphologies of the Ti48Al2Cr2Nb x Ta alloys at room temperature

3 结论

(1) Ta元素可有效优化Ti48Al2Cr2Nb合金的微观组织,随Ta原子分数增加,合金片层组织逐步细化,Ta元素通过抑制 γ 相形成并促进 α 相有序化,对 γ/α_2 相比比例及组织演化产生影响。其中,2%Ta为最佳添加量,Ti48Al2Cr2Nb2Ta合金中 γ -TiAl与 α_2 -Ti₃Al相协同分布,呈现均匀规整的网状-胞状组织。

(2) 添加Ta后Ti48Al2Cr2Nb合金的硬度、室温与

低温抗压强度均上升,这是固溶强化与细晶强化共同作用的结果。Ta原子分数为2%时,合金在室温与高温压缩测试中均表现出最优的抗压强度与塑性,且抗裂纹扩展能力更强。

(3) 不同Ta含量下Ti48Al2Cr2Nb合金均以脆性断裂为主,Ta含量显著影响断裂模式:不含Ta、1%Ta含量时为层片主导的韧脆混合断裂;2%Ta时为类解理或沿晶断裂;4%Ta含量下合金因组织不均匀呈现多机制叠加的脆性断裂。

参考文献:

- [1] Zhang X S, Chen Y J, Hu J L. Recent advances in the development of aerospace materials [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2018, 97: 22-34.
- [2] Liu J H, Zhang F Q, Nan H, et al. Effect of C addition on as-cast microstructures of high Nb containing TiAl alloys [J]. Metals, 2019, 9 (11): 1201.
- [3] Saeedipour S, Kermanpur A. On the microstructure and solidification behavior of N-bearing Ti-46Al-8Ta (at.%) intermetallic alloys [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28 (10): 6438-6448.
- [4] Zhang K R, Hu R, Yang J R, et al. The phase transformation behavior between γ lamellae and massive γ in a Ta containing TiAl-based alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 821: 153290.
- [5] Chen H M, Li X W, Chen Z P, et al. Investigation on electronic structures and mechanical properties of Nb-doped TiAl₂ intermetallic compound [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 780: 41-48.

- [6] Fang H Z, Chen R R, Chen X Y, et al. Effect of Ta element on microstructure formation and mechanical properties of high-Nb TiAl alloys [J]. Intermetallics, 2019, 104: 43–51.
- [7] Huang A, Hu D, Wu X H, et al. The influence of interrupted cooling on the massive transformation in Ti46Al8Nb [J]. Intermetallics, 2007, 15 (9): 1147–1155.
- [8] Dey S R, Bouzy E, Hazotte A. Intragranular nucleation sites of massive γ grains in a TiAl-based alloy [J]. Scripta Materialia, 2007, 57 (4): 365–368.
- [9] Liu G H, Li T R, Fu T L, et al. Morphology and competitive growth during the development of the parallel lamellar structure by self-seeding in directionally solidified Ti-50Al-4Nb alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 682: 601–609.
- [10] Deys R, Hazotte A, Bouzy E. Crystallography and phase transformation mechanisms in TiAl-based alloys: a synthesis [J]. Intermetallics, 2009, 17 (12): 1052–1064.
- [11] Cao J, Sun T L, Guo Z C, et al. Enhancement of room-temperature mechanical properties of TiAl alloy by trace addition of C [J]. Materials Science and Engineering A, 2023, 884: 145598.
- [12] Saeedipour S, Kermanpur A, Sadeghi F. Effect of N addition on microstructure refinement and high temperature mechanical properties of Ti-46Al-8Ta (at.%) intermetallic alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 817: 152749.
- [13] Saage H, Huang A J, Hu D, et al. Microstructures and tensile properties of massively transformed and aged Ti46Al8Nb and Ti46Al8Ta alloys [J]. Intermetallics, 2008, 17 (1/2): 32–38.
- [14] 张可人, 张乐乐, 潘恒沛, 等. Ta掺杂对 γ -TiAl基合金块状组织和力学性能的影响 [J]. 材料开发与应用, 2022, 37 (6): 76–82.
- [15] 张可人, 李劲光, 安俊亭, 等. 铸造 γ -TiAl合金晶粒细化方法研究进展 [J]. 铸造技术, 2024, 45 (3): 249–258.
- [16] Zhang K R, Hu R, Li J G, et al. Grain refinement of 1at.% Ta-containing cast TiAl-based alloy by cyclic air-cooling heat treatment [J]. Materials Letters, 2020, 274: 127940.
- [17] 张冬冬. Y对铸造Ti-48Al-2Cr-2Nb合金组织和室温性能的影响 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [18] Meng C L, Wang F M, Ma Y H, et al. Effect of Hf element introduction on structure and properties of TaNx coating by DC reactive magnetron sputtering [J]. Ceramics International, 2025, 51 (5): 6352–6364.
- [19] 田博. 变形TiAl合金力学性能研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2023.
- [20] 张小艳. 稀土Yb对钛铝合金组织和高温抗氧化性能影响研究 [D]. 西安: 长安大学, 2023.
- [21] Su X, Li P, Qu H J, et al. A study on the brittle-to-ductile transition temperature of forged β -solidifying TiAlMn and TiAlNi alloys [J]. Crystals, 2022, 12 (10): 1498.
- [22] Haußmann L, Neumeier S, Bresler J, et al. Influence of Nb, Ta and Zr on the interdiffusion coefficients and solid solution strengthening of γ -TiAl single phase alloys [J]. Metals, 2022, 12 (5): 752.
- [23] 胡焱. 钨、钼、铌掺杂对双相 γ -TiAl/ α_2 -Ti₃Al合金界面结构和性质的影响 [D]. 天津: 中国民航大学, 2020.
- [24] Zhou M, Hu R, Li J G, et al. Investigations of interfacial reaction and toughening mechanisms of Ta fiber-reinforced TiAl-matrix composites [J]. Materials Characterization, 2022, 183: 111584.
- [25] Lapin J, Kamysnykova K. Effect of Ta and W additions on microstructure and mechanical properties of tilt-cast Ti-45Al-5Nb-2C alloy [J]. Metals, 2021, 11 (12): 2052.
- [26] 郝彦超, 张建飞, 丁国, 等. 钨含量对NiAl-39V (Dy) 共晶合金组织及高温压缩性能的影响 [J]. 中国稀土学报, 2025, 43 (5): 1142–1149.
- [27] Gao Z T, Hu R, Zou H, et al. Metastable microstructure evolution and grain refinement in a low-Ta containing γ -TiAl alloy through heat treatment [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 29: 3642–3655.
- [28] Duan X Y, Huang Y F, Liu W Y, et al. Effect of Ta on the microstructure and mechanical properties of W-Ta alloys prepared using arc melting [J]. Materials Characterization, 2022, 188: 111823.
- [29] Pan H P, Zhang K R, Chen J M, et al. Variant selection of massive γ subgrains and corresponding mechanical properties in Ta containing γ -TiAl-based alloys [J]. Materials Letters, 2023, 333: 133689.
- [30] Zhao B K, Huang P, Zhang L B, et al. Temperature effect on stacking fault energy and deformation mechanisms in titanium and titanium-aluminium alloy [J]. Scientific Reports, 2020, 10: 3086.
- [31] Wang Y P, Zhang S, Li H, et al. Wire arc additive manufacturing of 7075/5356 aluminum alloy laminated composite: microstructure, mechanical properties and fracture mechanism [J]. Welding in the World, 2025, 69: 1515–1528.
- [32] Deng Z, Chen Z X, Wang Y P, et al. In-situ synthesized multi-component particle reinforced TiAl composite with excellent mechanical properties [J]. Materials Today Communications, 2024, 38: 108060.
- [33] Zhang S K, Tian N, Li D Y, et al. Microstructure evolution and fracture mechanism of a TiAl-Nb alloy during high-temperature tensile testing [J]. Materials Science and Engineering A, 2022, 831: 142094.
- [34] Chen T S, Chiba T, Koyama M, et al. Factors distinguishing hydrogen-assisted intergranular and intergranular-like fractures in a tempered lath martensitic steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2022, 53 (5): 1645–1658.
- [35] Zhou Z C, Liu R C, Shen Y Y, et al. Microstructural evolution and embrittlement of a β -solidifying γ -TiAl alloy during exposure at 700 °C [J]. Materials Science and Engineering A, 2022, 852: 143704.