

引用格式: 王岩, 罗耀峰, 何京军, 等. TiAl 合金热机械处理工艺进展[J]. 航空材料学报, 2025, 45(5): 26-43.

WANG Yan, LUO Yaofeng, HE Jingjun, et al. Research progress in thermomechanical treatment process of TiAl alloys[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(5): 26-43.

## TiAl 合金热机械处理工艺进展

王岩<sup>1,2</sup>, 罗耀峰<sup>1</sup>, 何京军<sup>1</sup>, 胡庆<sup>1</sup>, 刘彬<sup>1,2</sup>, 刘咏<sup>1,2\*</sup>

(1. 中南大学粉末冶金研究院, 长沙 410083; 2. 中南大学粉末冶金全国重点实验室, 长沙 410083)

**摘要:** TiAl 合金由于其优异的比强度、比刚度和高温性能而备受关注, 在航空航天领域拥有巨大的应用潜力。随着航空航天科技的发展, 对其装备及服役材料的性能要求也进一步提升。热机械处理在航空航天装备制造技术中占有十分重要的地位, 是获得高性能 TiAl 合金的关键途径。本文主要从 TiAl 合金热机械处理的发展现状出发, 综述 TiAl 合金热塑性变形行为、热加工(热锻造、热轧制、热挤压)方法与后续热处理组织调控等方面的研究进展, 并提出 TiAl 复合材料的热机械处理工艺开发及参数遴选、大尺寸 TiAl 合金构件的热加工优化设计、低成本 TiAl 合金的热机械处理技术研发、新型 TiAl 合金微观组织的热机械处理调控、以及基于大数据构建的 TiAl 合金热机械处理工艺参数高效率筛选等发展方向。

**关键词:** TiAl 合金; 热机械处理; 热加工; 热处理; 工艺设计; 组织调控

**doi:** 10.11868/j.issn.1005-5053.2025.000090

**CSTR:** 32420.14.j.issn.1005-5053.2025.000090

中图分类号: V252

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2025)05-0026-18

## Research progress in thermomechanical treatment process of TiAl alloys

WANG Yan<sup>1,2</sup>, LUO Yaofeng<sup>1</sup>, HE Jingjun<sup>1</sup>, HU Qing<sup>1</sup>, LIU Bin<sup>1,2</sup>, LIU Yong<sup>1,2\*</sup>

(1. Powder Metallurgy Research Institute, Central South University, Changsha 410083, China; 2. National Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** TiAl alloys have attracted much attention due to its excellent specific strength, specific stiffness, and high-temperature performance, which has great potential for application in the aerospace industry. With the development of aerospace technology, the performance requirements for its equipment and service materials have further increased. Thermomechanical treatment plays a very important role in the field of manufacturing technology of aerospace equipment. The mature preparation processes for TiAl alloys are mainly ingot metallurgy and powder metallurgy. TiAl alloys are obtained by both processes require subsequent thermomechanical treatment. Combining the processes of deformation with heat treatment, the microstructure of TiAl alloys can be effectively controlled, thereby improving the room-temperature brittleness and fracture toughness of alloys. On the basis of fully understanding the thermoplastic deformation behavior of TiAl alloys, further research on different hot working methods and processes, process parameter design and control of TiAl alloys are of great significance for reducing the processing cost of TiAl alloy products as well as promoting their production and application. This article mainly reviews the development status of thermomechanical treatment of TiAl alloys. The research progress in the thermoplastic deformation behavior as well as microstructure control of hotworking (hot forging, hot rolling, hot extrusion) and subsequent heat treatment of TiAl alloys is summarized. On the basis, this article proposes the development directions in thermomechanical treatment of TiAl alloys. The first is the research on thermomechanical treatment process of TiAl composite materials. On the basis of high-throughput material design, exploring the hot working and post-treatment process routes suitable for TiAl composites, is expected to develop a new type of TiAl material with excellent high-temperature comprehensive performance. The second is the optimization design of hot working process for large-sized TiAl alloy components. Combining machine learning methods to optimize the hot working parameters of large-sized TiAl alloy components, as well as

predict the microstructure evolution during hot working, and developing new mold materials to effectively control the processing temperature, are expected to significantly improve the controllability and stability in the forming process of large-sized TiAl components. The third is the development of low-cost thermomechanical treatment technology of TiAl alloys, such as no package hot working technology and single-step heat treatment process. The fourth is the thermomechanical treatment control of new microstructures for TiAl alloys. On the basis of introducing nanostructures to refine the microstructure of TiAl alloys, a new type of TiAl alloy microstructure design is expected to carry out by thermomechanical treatment to further enhance the performance of TiAl alloys. The fifth is the efficient screening of thermomechanical treatment process parameters for TiAl alloys. Integrating multidisciplinary knowledge, constructing a large database of components, hot working/heat treatment parameters, microstructure, and properties, can reduce the costs and cycles of researches.

**Key words:** TiAl alloy; thermomechanical treatment; hot working; heat treatment; process design; microstructure regulation

《中国制造 2025》明确将航空航天装备列为十个重点发展领域之一,这对在空天环境下服役的高温结构材料提出了更为苛刻的要求。其中,航空发动机材料不仅要耐高温、抗氧化,还要具备轻质、高强的特点以提升推重比并节省燃料<sup>[1-2]</sup>。TiAl 合金作为一种金属间化合物,具有密度低( $3.7\sim 4.3\text{ g/cm}^3$ )、比强度和比刚度高、抗氧化和抗蠕变性能良好等优点,已成为新一代航空发动机材料的有力候选者<sup>[3-5]</sup>。特别是在  $600\sim 800\text{ }^\circ\text{C}$  的温度范围内, TiAl 合金表现出与镍基高温合金和钛合金相近甚至更高的比强度<sup>[6]</sup>,因此得到了工业界和学术界的广泛关注<sup>[7]</sup>。航空发动机低压涡轮叶片使用 TiAl 合金替代镍基高温合金,可使发动机减重  $20\%\sim 30\%$ ,显著提高发动机性能和燃油效率。此外, TiAl 合金还可用于制造航空发动机中的高压压缩机叶片、飞行器的热防护部件,以及汽车发动机中的涡轮、阀门等。

虽然 TiAl 合金在航空和汽车工业等领域的应用已取得了突破,但该合金的室温脆性和较低的断裂韧性,制约了其在安全性和可靠性要求极高的航空航天领域的大规模采用。TiAl 合金的微观组织一般以  $\gamma$  相和  $\alpha_2(\alpha)$  为主,还含有一定量的  $B_2$  相,其较成熟的制备工艺主要为铸锭冶金<sup>[8-9]</sup>和粉末冶金<sup>[10-11]</sup>,两种工艺路线获得的 TiAl 合金均需要后续的热机械处理,结合变形与热处理工艺实现合金微观组织结构的有效调控,从而改善 TiAl 合金的室温脆性和断裂韧性。其中, TiAl 合金的变形方法主要包括热锻造、热挤压和热轧制三种,由于变形温度较高,且热加工窗口窄,一般采取等温或近等温加工方式。但 TiAl 合金的本征脆性使得该材料即使在高温下加工,也需要精准控制变形参数<sup>[12-14]</sup>,这极大地提高了其加工难度。在充分了解 TiAl 合金热塑性变形行为的基础上,进一步开展 TiAl 合

金不同热加工工艺方法与流程、工艺参数设计与控制等的研究,对于降低 TiAl 合金产品的加工成本,促进其生产应用具有重要意义。同时, TiAl 合金的性能对其组织结构形态十分敏感,越来越高的性能要求使得后续的热处理工序尤为关键<sup>[15-17]</sup>。适当的热处理可以促进  $\gamma$  相与  $\alpha_2(\alpha)$  相之间的有序化转变,提高合金的有序度,进而增强其强度;热处理还能够有效细化晶粒、减少缺陷,从而提升合金的塑性和韧性<sup>[18]</sup>。因此,开发成本较低并且能够显著提升合金综合性能的热机械处理方法是未来 TiAl 合金复杂构件制造的研究重点之一。

本文从 TiAl 合金热机械处理所涉及的热塑性变形行为、热加工组织调控及变形组织的后续热处理调控三个方面,结合本团队部分研究成果,介绍 TiAl 合金的相关研究进展,并对 TiAl 合金热机械处理技术现存的问题及今后的研究发展方向进行了总结和展望。

## 1 热塑性变形行为

TiAl 合金的热加工是一个热激活过程,其中流变应力是反映材料热塑性变形行为的关键性指标之一。TiAl 合金的热塑性变形行为复杂,受变形温度、应变速率、应变量等多种因素影响,其热变形能力差主要与有序金属间化合物相扩散速率低导致的热加工窗口窄有关<sup>[19-20]</sup>。因此,在热机械处理之前,通常需要先明确 TiAl 合金的高温流变应力随变形条件的变化规律,遴选出较好的热加工参数,这对于材料加工特性的衡量和组织性能的控制均具有重要的意义。同时,鉴于 TiAl 合金多相的组织特征,其变形过程中的组织演化十分复杂,且强烈依赖热加工参数<sup>[21]</sup>,因此对于 TiAl 合金变形机制,特别是不同变形条件下的动态再结晶

(dynamic recrystallization, DRX)机制的理解可以为实际的热加工提供理论指导。

### 1.1 流变应力本构关系与热加工图

热变形的本构模型是流变应力与热变形参数(变形温度、应变速率和应变量)之间的基本数学关系式,表征了材料变形过程中流变应力对各热变形参数耦合影响的动态响应。目前本构模型主要可以分为唯象型本构模型、物理型本构模型和人工神经网络模型<sup>[22]</sup>。最常用的 TiAl 合金本构模型是唯象型本构模型中的 Arrhenius 本构模型,在该模型中,变形温度  $T$  和应变速率  $\dot{\epsilon}$  的影响也可以用 Zener-Hollomon ( $Z$ ) 参数综合描述 ( $Z = \dot{\epsilon} \exp(\frac{Q}{RT})$ ,  $Q$  为变形激活能)。利用上述模型,在实验的基础上,国内外研究者已构建了不同成分 TiAl 合金的流变应力本构关系,并计算了其激活能。

大量研究表明, TiAl 合金高温变形抗力和激活能( $Q$ )的大小与合金元素和相组成有关。Chen 等<sup>[23]</sup>建立了 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金的 Arrhenius 本构模型,获得的  $Q$  值为 296.5 kJ/mol, 其与高 Nb-TiAl 合金相比  $Q$  值较低的原因主要归结于 Nb 元素含量低使得固溶元素对位错运动抑制作用减弱;适当提高温度、降低应变速率可以降低合金的应力指数,对减少锻造裂纹倾向有益。Ge 等<sup>[24]</sup>建立了 Ti-44Al-8Nb-1.5Mn-1.0Cr-0.2B-0.2Y 合金的 Arrhenius 本构模型,得到的  $Q$  值为 375 kJ/mol, 分析认为大量  $\beta$  相的存在降低了合金的高温变形抗力,故相较于其他合金,该合金的激活能较低。TiAl 合金的高温变形能力还与其初始状态密切相关。中南大学对挤压态 Ti-47Al-2Cr-0.2Mo 合金的热变形行为进行了研究<sup>[25]</sup>, 获得的热变形  $Q$  值(390 kJ/mol)与 Du 等<sup>[26]</sup>报道的热挤压态 Ti-47.5Al-Cr-V 合金的  $Q$  值相近(409 kJ/mol), 这一结果高于其他相似成分热等静压态合金的  $Q$  值(371<sup>[27]</sup>、360 kJ/mol<sup>[28]</sup>), 主要是因为挤压态合金细小的初始晶粒使得晶界强化效果增强,从而提高了合金的变形阻力。引入第二相进行复合化对 TiAl 合金的热变形抗力也有较大的影响。Yuan 等<sup>[29]</sup>通过粉末冶金方法制备 Ta 颗粒增强 Ti-48Al-2Cr-2Nb-0.2W 基复合材料,其高温塑性流变行为研究表明,20%(体积分数,下同) Ta 颗粒添加后复合材料的热变形  $Q$  值在 240~280 kJ/mol, 显著低于其他 TiAl 合金,材料的热变形能力明显提高。因此,成分设计(合金化与复合化)、初始相结构与组织的调整均有助于提高 TiAl 合金的热变形能力。

材料发生塑性变形时在不出出现失稳破坏的情

况下,能够达到的变形能力通常称之为材料的加工性能。材料的加工性能对塑性变形十分重要,而热加工图是最直观的描述材料热加工性能的手段。目前广泛采用的热加工图为 Prasad 等提出的基于动态材料模型(dynamic material modeling, DMM)的加工图<sup>[30]</sup>,它将外界能量与材料发生塑性变形消耗的能量联系起来,用能量耗散效率( $\eta$ )值来判断合金的加工性能,并进一步采用失稳准则<sup>[31]</sup>预测合金的不稳定区域,将  $\eta$  图与失稳图叠加即形成热加工图。热加工图目前已在 TiAl 合金热加工性能的评价和热加工参数优化方面得到了广泛应用。

由于 TiAl 合金成分的多样,使其构建的热加工各不相同,优化出的热加工参数也有所差异。一般来说, TiAl 合金热变形  $\eta$  值随着应变量的增加而有所提高<sup>[32]</sup>。Xin 等<sup>[33]</sup>考虑应变量的影响,利用应变迭代法建立的热变形本构方程获得包含应变变量的高 Nb-TiAl 合金三维能量耗散图。研究发现,在  $\eta$  值相同的变形条件下所获得的变形组织相近;这一新型三维热加工图实现了 TiAl 合金热变形组织的预测和热加工参数的优化。热加工图中不同的  $\eta$  值反映了 TiAl 合金在不同变形条件下热变形机制的差异。Kong 等<sup>[34]</sup>建立 Ti-46Al-2Cr-4Nb-0.2Y 合金的热加工图,理想的热加工区分别对应  $\alpha_2$  相的无序化及超塑性区,超塑性区域的  $\eta$  值达到 0.6, 样品发生完全 DRX、组织均匀且细小。TiAl 合金中相成分的不同对  $\eta$  值也有一定的影响。Tian 等<sup>[35]</sup>对 Ti-44.25Al-3.84Nb-1.59Mo-0.1B-0.1Y 合金热加工图的研究发现,由于大量  $\beta$  相的存在,合金在不同变形条件下的  $\eta$  值普遍较高,即使在低温较高应变速率区间,  $\eta$  值仍大于 0.3, 其高温变形能力明显提高。Jiang 等<sup>[36]</sup>的研究也表明,通过提高 TiAl 合金中 Mo 元素的含量可获得较高  $\beta$  相含量的组织,可以减小失稳的发生,这主要源于  $\beta$  相的“润滑作用”。因此,  $\beta$  相的引入有利于 TiAl 合金热加工性能的提高。

适当的复合化手段有助于提高 TiAl 合金的热变形能力。中南大学利用放电等离子烧结方法制备  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiAl}$  复合材料并评价其热加工性能,获得的热变形  $Q$  值(336.5 kJ/mol)远低于其他 TiAl 合金(371~541 kJ/mol)<sup>[27,37-41]</sup>和 Nb 颗粒增强 TiAl 基复合材料的热变形  $Q$  值(447.4 kJ/mol)<sup>[42]</sup>,同时  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纤维的加入也明显拓宽  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiAl}$  复合材料的热加工窗口(表 1)。这说明  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纤维对 TiAl 合金热加工性能起到有益的作用。

表 1 TiAl 合金及复合材料热变形激活能( $Q$ )与热加工窗口的比较

Table 1 Comparison of deformation activation energy and stable processing regions for TiAl alloys and composites

Composition	$Q/(kJ \cdot mol^{-1})$	Hot processing window	Reference
Ti-43Al-4Nb-1.4W-0.6B	419.2	1096-1120 °C, 0.001-0.005 s <sup>-1</sup> ; 1180-1200 °C, 0.001-0.005 s <sup>-1</sup>	[39]
Ti-43Al-6Nb-1Mo-1Cr	541	1100-1200 °C, 0.01-0.001 s <sup>-1</sup>	[37]
Ti-44Al-6Nb	485.7	1200 °C, 0.1-0.01 s <sup>-1</sup>	[40]
Ti-45Al-8Nb-2Cr-0.2B	429.4	1100 °C, 0.005 s <sup>-1</sup>	[38]
Ti-48Al-2Cr-2Nb	371	1100-1140 °C, 0.01-0.005 s <sup>-1</sup> ; 1180-1210 °C, 0.01-0.001 s <sup>-1</sup>	[27]
Ti-45Al-7Nb-0.3W	414	1150 °C, 0.1 s <sup>-1</sup>	[41]
Ti-45Al-5Nb-0.4W/2 vol.%Nb	447.4	1090-1110 °C, 0.05-0.001 s <sup>-1</sup> ; 1190-1200 °C, 0.001 s <sup>-1</sup>	[42]
Ti-45Al-7Nb-0.4W-0.1B/5 %Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	336.5	1150-1200 °C, 0.1-0.001 s <sup>-1</sup>	This work

## 1.2 热变形机制

通常, TiAl 合金在进行热加工时的微观变形机制主要有位错运动、孪生变形和 DRX 等<sup>[43]</sup>。合金在进行热加工时,首先是在晶粒内形成高密度的位错,从而导致合金内部产生应力集中的现象。随着变形量的增加,位错进一步增殖发展、相互交织缠结;位错运动过程中遇到晶界或者杂质形成位错墙,在应力的作用下,位错向位错墙处不断累积,形成亚晶。在位错不足以消耗大量持续应力的作用时,晶粒内将发生机械孪生,促进变形的进行。随着变形量的进一步增加,合金的组织内部存储足够发生 DRX 的畸变能,触发 DRX 的进行,从而生成细小的再结晶晶粒。

TiAl 合金的热变形机制与变形条件紧密关联。Wang 等<sup>[44]</sup>通过单轴热压缩实验对 Ti-43Al-4Nb-1.4W-0.6B-0.2Y 合金在不同  $Z$  值条件下的变形机制进行研究。分析认为,DRX 和孪生是低  $Z$  条件下主要的变形机制;而在高  $Z$  下,除 DRX 外还伴随着片层团、 $\gamma$  晶粒和  $\beta$  相的弯曲。Jiang 等<sup>[45]</sup>对 Ti-43.9Al-4.3Nb-0.9Mo-0.1B-0.4Si 合金的研究则发现,在高  $Z$  和中  $Z$  条件下,位错攀移和孪生伴随 DRX 是合金主要的变形机制。虽然不同变形条件下 TiAl 合金的热变形机制有所差异,但 DRX 仍是 TiAl 合金最主要的变形软化机制。由于 TiAl 合金中不同相的晶体结构不同,其 DRX 行为也并不一致。Li 等<sup>[37]</sup>对 Ti-43Al-6Nb-1Mo-Cr 合金的研究表明,合金中  $\beta$  相的 DRX 最先发生,高温下的相转变使得 TiAl 合金中的  $\beta$  相和  $\alpha$  相均能够累积足够的位错从而发生 DRX 形核。关于片层组织在 TiAl 合金热变形过程中对 DRX 的作用, Xu 等<sup>[46]</sup>认为热变形会导致片层严重弯折,这些弯折带是 DRX 形核的优先位置,且  $\gamma$  相和  $\alpha_2$  相的 DRX 共同导致

片层的分解。而 Li 等<sup>[47]</sup>则认为 DRX 晶粒首先出现在片层团边界处,而片层团的分解则是由  $\alpha_2$  相的 DRX 造成的。

中南大学针对热等静压态 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金的热变形机制展开系统研究<sup>[27]</sup>。当应变速率在 0.001~0.1 s<sup>-1</sup> 范围时,合金的主要软化机制为 DRX;在无序化转变温度( $T_c$ )以下时,由于  $\alpha_2$  相滑移系的缺失,DRX 主要发生在  $\gamma$  相;当温度升高到  $T_c$  以上时,伴随着  $\alpha_2$  相的无序化转变, $\alpha$  相的 DRX 有所增加。而当应变速率为 1 s<sup>-1</sup> 时,在  $T_c$  以下温度变形的合金出现微裂纹和孔洞;高于  $T_c$  时没有观察到微裂纹,此时动态回复(dynamic recovery, DRV)是合金流动软化的主导因素。同时,片层组织在变形过程中发生扭折和分解,较高的温度和较低的应变速率有利于片层组织中 DRX 的发生。

作为 TiAl 合金热变形的的主要软化机制, TiAl 合金 DRX 的形核机理一直是其热变形行为研究关注的焦点。TiAl 合金的 DRX 形核方式主要包括不连续动态再结晶(discontinuous dynamic recrystallization, DDRX)和连续型动态再结晶(continuous dynamic recrystallization, CDRX), DDRX 通常以应力诱导晶界弓出为特征, CDRX 通常以亚晶渐进式旋转为特征。研究表明,在 TiAl 合金中两种 DRX 形核机制往往共同存在,且与变形参数存在较强的关联性<sup>[48]</sup>。但截至目前,不同变形参数下 TiAl 合金中不同相的 DRX 形核机制还没有形成统一的结论。Chen 等<sup>[49]</sup>认为在 Ti-48Al-2Nb-2Cr 合金的热变形过程中  $\gamma$  相的 DDRX 和 CDRX 共存。Xu 等<sup>[50]</sup>分析不同变形参数下 Ti-43Al-4.5Nb-2Cr-(Cu, Fe, Si, W, Se)合金的变形组织,也发现  $\gamma$  相中 CDRX 与 DDRX 同时存在,但 CDRX 仅发

生在大尺寸的  $\gamma$  晶粒中,而  $\alpha$  相主要发生 CDRX。Li 等<sup>[37]</sup> 观察了不同条件下 Ti-43Al-6Nb-1Mo-Cr 合金的变形组织。发现在不同温度下,  $\gamma$  相的 DDRX、 $\gamma$  相的 CDRX 和  $\alpha$  相的 DRV 分别主导合金的变形过程。Tian 等<sup>[35]</sup> 研究 Ti-44.25Al-3.84Nb-1.59Mo-0.1B-0.1Y 的变形组织,分析认为  $\gamma$  相主要发生 DDRX,  $\alpha$  相则依赖于 CDRX 方式形核。关于 TiAl 合金 DRX 的形核机制,已达成的基本共识是  $\alpha$  相的软化机制主要为 CDRX。通常认为,由于  $\alpha$  相的层错能与  $\gamma$  相相比较,位错迁移能力差,因此  $\alpha$  相中较难发生需要长程迁移的 DDRX 模式。

中南大学对热挤压态 Ti-47Al-2Cr-0.2Mo 合金在不同  $Z$  值下的 DRX 形核机制展开研究(图 1)<sup>[25]</sup>。在较高  $Z$  值下变形时,合金中  $\gamma$  相和  $\alpha_2$  相的 DRX 形核机制主要由 CDRX 主导,  $\alpha_2/\gamma$  层状结构中出现弯曲和扭折现象, DRX 形核也发生在片层结构的边界以及弯曲和扭折的位置;在较低  $Z$  值条件下,合金中  $\gamma$  相的 DDRX 和 CDRX 共存,而  $\alpha_2$  相的形核仍以 CDRX 为主,原始的  $\alpha_2/\gamma$  片层发生破碎和分解,同时形成新的片层结构。研究还发现,增强体的添加对 TiAl 合金的 DRX 形核机制也有重要的作用。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  纤维有利于提高  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiAl}$  复合材料的 DRX 程度,并细化  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纤维附近 TiAl 基体的晶粒。在高应变速率条件下变形后,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纤维附近的应力集中为孪晶交截的形成提供条件,形变孪晶和孪晶交截诱导的 DRX 被激活<sup>[51]</sup>。

DRX 形核机制对 TiAl 合金中的组织演化有明显的影响<sup>[20,52-53]</sup>。中南大学对热挤压态合金热变形组织的进一步研究表明(图 2)<sup>[25]</sup>,挤压态试样中存在两个  $\{0001\}$  基面织构,经不同  $Z$  参数条件下变形后,合金中的织构类型转变为  $\{11\bar{2}0\} \langle 0001 \rangle$  横向织构或倾斜的  $\{11\bar{2}0\} \langle 0001 \rangle$  横向织构。由于 DDRX 后新生成的 DRX 晶粒与母晶粒之间的取向是随机的,通常不会产生 DRX 晶粒的择优取向和强晶体织构,因此在较高  $Z$  值下变形的合金两相的组织强度均显著降低。而在较低  $Z$  值条件下,CDRX 机制的亚晶粒旋转虽然轻微改变亚晶粒的取向,但由于变形机制的相似性,亚晶粒和母晶粒都有向同一方向旋转的趋势,因此  $\alpha_2$  相经过 CDRX 过程后,织构强度明显增强,而  $\gamma$  相在变形过程中 DDRX 和 CDRX 机制的共存使得织构强度增加得不明显。

## 2 热加工组织调控

在热塑性变形基本规律和机理研究的基础上,国内外学者针对 TiAl 合金的热机械加工方法开展大量工作。由于 TiAl 合金的变形温度较高,且热加工窗口窄,必须采取等温或近等温加工方式,这对设备和工艺提出较高的要求。通过优化热加工工艺,可以有效控制 TiAl 合金的微观组织演变,从而获得具有优良性能的 TiAl 合金构件。以铸锭冶

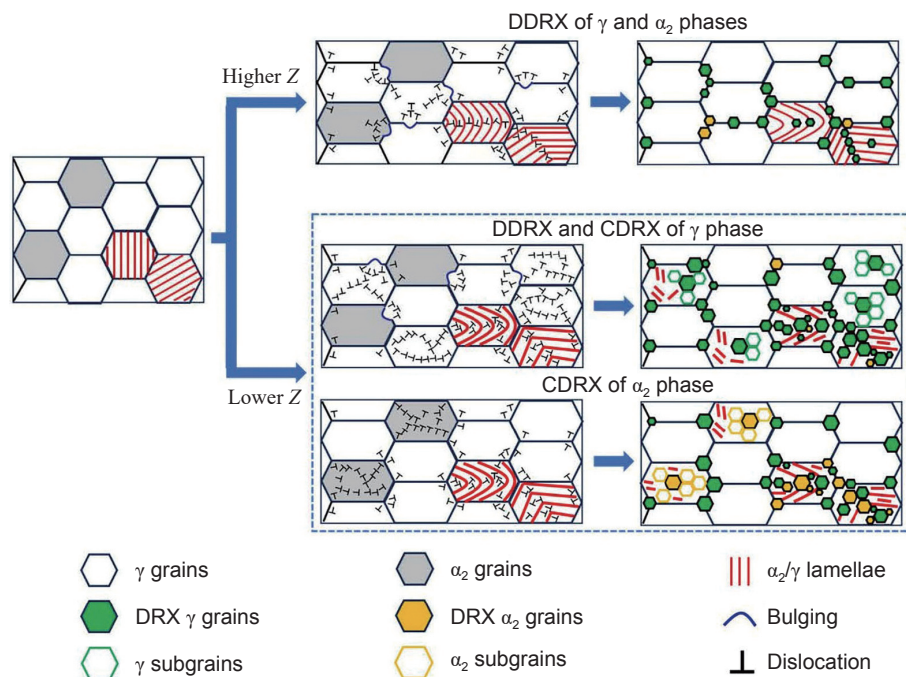


图 1 挤压态 Ti-47Al-2Cr-0.2Mo 合金在不同  $Z$  值下的 DRX 形核机制示意图<sup>[25]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of DRX nucleation mechanisms of the Ti-47Al-2Cr-0.2Mo alloy deformed at different  $Z$  values<sup>[25]</sup>

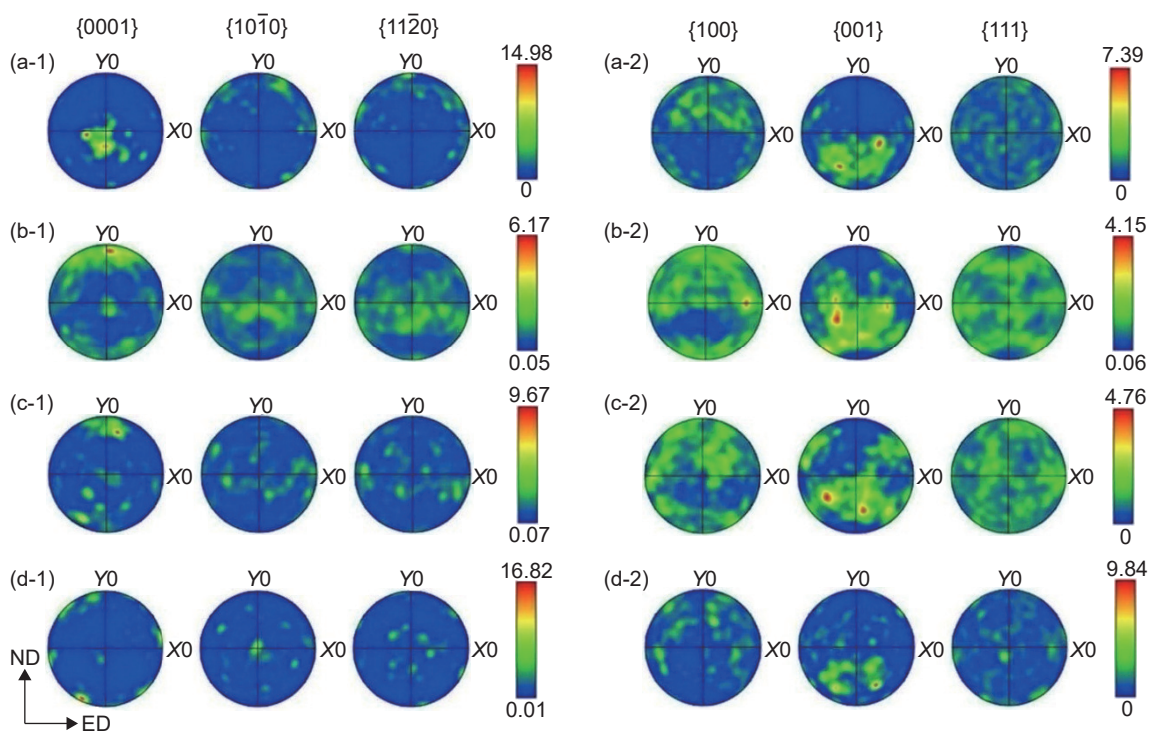


图2 挤压态 Ti-47Al-2Cr-0.2Mo 合金及其在不同 Z 值下变形合金(应变=0.7)的极图<sup>[25]</sup>  
(a)挤压态; (b)lnZ=31.3; (c)lnZ=25.7; (d)lnZ=23.4; (1) $\alpha_2$  相; (2) $\gamma$  相

Fig. 2 Pole figures of the as-extruded Ti-47Al-2Cr-0.2 Mo alloy and alloy deformed to a strain of 0.7 at different Z values<sup>[25]</sup>  
(a)as-extruded state; (b)lnZ=31.3; (c)lnZ=25.7; (d)lnZ=23.4; (1) $\alpha_2$  phase; (2) $\gamma$  phase

金和粉末冶金为基本工艺路线, TiAl 合金常用的热机械加工方法包括热锻造、热挤压、热轧制等<sup>[54]</sup>。

## 2.1 热锻造

TiAl 合金的热锻造是在一定温度下通过锻压机对 TiAl 合金坯料施加载荷, 使合金在压力和温度的双重作用下变形, 从而在高温动态下获得晶粒细小、均匀的组织。TiAl 合金的热锻造绝大多数采用等温锻造和包套锻造两种方式。

等温锻造是在锻造过程中将环境温度维持在坯料变形温度, 避免材料温度下降而导致开裂, 同时在恒定的温度条件下, 通过选择合适的锻造速度, 可以提高锻造后材料的性能。同传统锻造相比, 等温锻造工艺锻造温度更高、变形速度更慢, 因此材料受力及流动状态更好、成品率也更高。该工艺不仅可以成形 TiAl 合金零部件, 也可以作为均匀和细化 TiAl 合金组织的重要工序。王淑云等<sup>[55]</sup>对 Ti-47Al-2Cr-1Nb 合金进行了两次等温锻造研究, 相比于铸态组织, 经两次等温锻造后的微观组织得到明显的细化, 获得了细小均匀的双态组织。Zhang 等<sup>[56]</sup>对 Ti-44Al-4Nb-4V-0.3Mo-Y 合金在  $\beta+\gamma$  两相区温度下进行等温锻造, 获得由细小的  $\gamma$  晶粒和块状的  $\beta(B_2)$  相组成的均匀组织, 相比于在  $\beta+\alpha$  两相区锻造, 消除了残余片层, 且组织更为

细小。

TiAl 合金等温锻造的设备成本和加工要求都非常高, 对模具材料的承温能力也提出极大的挑战。现有的设备大多无法维持 TiAl 合金理想的加工温度, 实际上属于近等温锻造。多步近等温锻造有利于 TiAl 合金的晶粒细化。He 等<sup>[57]</sup>采用玻璃粉浆料覆盖 Ti-47Al-2Nb-2Cr-0.4(W, Mo) 合金坯料, 将模具加热至 900 °C 后进行三步锻造, 得到总压下量 60% 的锻饼, 无裂纹且组织细小。多向近等温锻造对 TiAl 合金锻坯组织的细化效果更为显著<sup>[58]</sup>。葛庚午<sup>[12]</sup>对 Ti-44Al-8Nb-1.5Mn-1.0Cr-0.2B-0.2Y 合金进行多种工艺的近等温锻造, 优化出适宜的加工参数为 1280 °C、0.01~0.05 s<sup>-1</sup>, 提高模具温度能够显著降低坯料的开裂倾向, 且多步锻造、多向锻造均可以明显改善锻坯组织的均匀性。有限元模拟有助于系统性地研究锻造温度、应变速率、高径比以及工艺方式对锻造过程的影响, 是非常重要的热加工工艺分析手段。进一步利用 DEFORM 软件对高镍 TiAl 合金的热锻造进行有限元模拟, 研究发现高径比的增加可以提高坯料心部温度, 但同时也会增加变形的不均匀性; 较高的温度和较大的应变速率能够保持合金温度, 增加变形均匀性; 在模拟结果的指导下实现高镍 TiAl 合金

的多步近等温锻造开坯。

目前等温和近等温锻造已在 TiAl 合金航空构件的制备上得到应用。德国 GKSS 公司采用等温锻造方法制备的 Ti-47Al-1.5Nb-1Cr-1Mn-0.2Si-0.5B 锻坯,直径达到 600 mm<sup>[59]</sup>。德国 Leistriz 公司采用 Mo 合金作为模具材料,在 1150 °C 进行两步等温锻造,制备出 Ti-43.5Al-4Nb-1Mo-0.1B 航空发动机高压压气机叶片<sup>[60]</sup>。北京科技大学 Ge 等<sup>[61]</sup>将 Ti-44Al-8Nb-1.5Mn-1Cr-0.2B-0.2Y 合金铸锭三次重熔之后切取圆柱形锻件,在锻压机上进行近等温锻造,获得无裂纹的锻造薄饼。经过后续系统研究,已成功实现 TiAl 合金的单步和多步近等温锻造,一次变形量可达 80%,锻坯质量良好<sup>[62]</sup>。

包套锻造是另一种常用的 TiAl 合金热锻造方式,属于近等温锻造工艺。包套锻造通过在锻造前外加包套包裹 TiAl 合金坯料,抵消锻造过程中产生的二次拉应力,防止氧化并保持材料温度,在一定程度上解决了变形过程中的开裂问题,更适合要求高变形速率的 TiAl 合金。与等温锻造相比,包套锻造对锻造设备的要求更低,在普通液压机上即可进行,且可以采用更高的变形速率(达到  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ),是一种方便、高效并且节约成本的锻造技术。其缺点在于流程较长,无法直接成型零部件。包套锻造后, TiAl 合金变形组织均匀性得到明显改善,锻造组织更加细小均匀<sup>[63]</sup>。Niu 等<sup>[64]</sup>在 1250 °C、 $0.01 \text{ s}^{-1}$  条件下对 Ti-43Al-6Nb-1B 合金进行三步包套锻造,每一道次间进行 1250 °C、1 h 的热处理,总变形量达 80%,获得的锻饼无裂纹,组织转变为细小的双相组织。Cheng 等<sup>[65]</sup>基于前期研究结果提出一种双道次锻造+退火的包套锻造工艺,成功制备出组织均匀、再结晶完全的大型锻坯。为了降低坯料锻造过程中的温降,实现变形温度的均匀性,在包套设计时常采用在包套与坯料之间添加保温

棉等隔热手段,以防止开裂并获得均匀的微观组织<sup>[66]</sup>。同时,针对包套的厚度、高径比等展开有限元模拟,也对指导锻造包套的设计具有重要的作用。研究表明,随着包套厚度的增加,合金温度的分布更为均匀,但厚度超过一定值后,温度分布变化较小;此外,端面温度下降更快,故端部的外加保温措施十分必要<sup>[67]</sup>。

通过合理的包套设计,哈尔滨工业大学、西北工业大学等研究团队均已利用包套锻造获得大尺寸 TiAl 合金锻坯。中南大学采用粉末冶金方法结合包套锻造<sup>[68]</sup>成功制备出直径达 450 mm 的 TiAl 合金锻饼(图 3)。

目前,针对 TiAl 复合材料的热锻造的研究还鲜有报道。中南大学采用 304 不锈钢包套,利用三道次包套锻造,成功制备  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiAl}$  复合材料锻坯,总变形量达 70%,道次间进行 1200 °C、0.5 h 中间退火,锻造结束后进行 850 °C、3 h 炉冷退火,去除包套后样品表面完整、无宏观裂纹(图 4(a)~(d)),且  $\text{Al}_2\text{O}_3$  短纤维均匀分布在 TiAl 基体中, TiAl 基体晶粒特别均匀细小(图 4(e)、(f))。

## 2.2 热轧制

TiAl 合金在高温下经过轧机的轧制变形,可以获得所需尺寸的板材。热轧制能够有效降低 TiAl 合金的变形抗力,提高板材的成形质量<sup>[69]</sup>。同时,坯料在热轧制过程中处于多向压应力状态,有利于 TiAl 合金的组织细化,提高合金的力学性能和热稳定性。相比于热锻造方法,热轧制过程更容易引起 TiAl 合金坯料侧边开裂<sup>[70]</sup>,因此,需要更严格地控制变形温度、轧制速度和轧下量。变形温度的选择应根据 TiAl 合金的具体成分和性能要求来确定,以确保材料在轧制过程中具有良好的变形能力,防止坯料开裂,但过高的温度也可能导致合金的严重氧化。轧制速率应适中,以避免速度过快



图3 粉末冶金 TiAl 合金锻件 (a)包套;(b)锻坯

Fig. 3 Powder metallurgy TiAl alloy forging (a)cladding; (b)forging billet

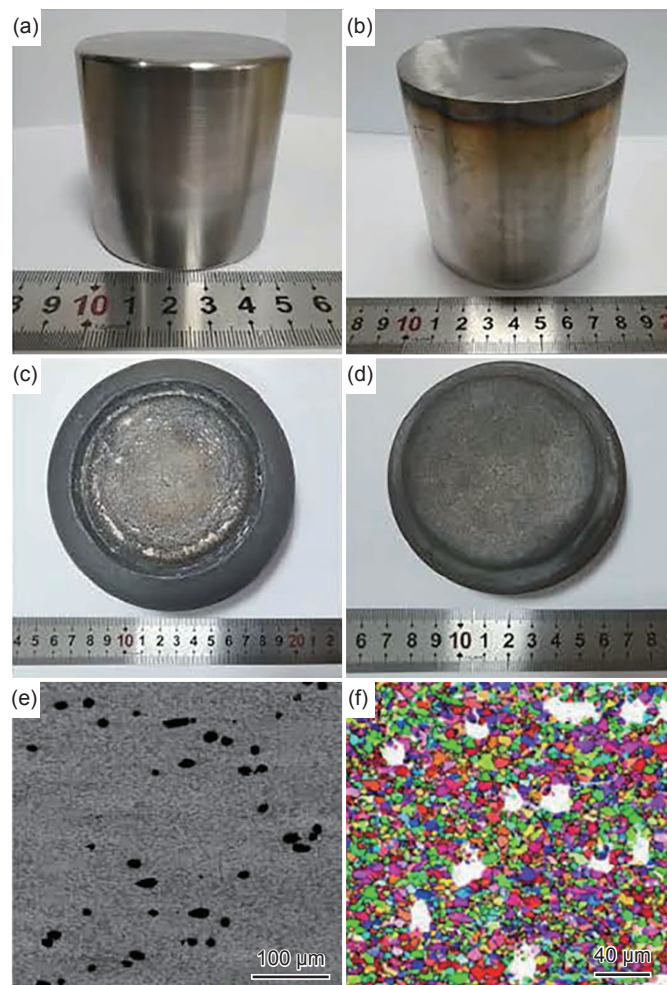


图4 包套锻造  $\text{Al}_2\text{O}_3_f/\text{TiAl}$  复合材料的形貌及组织 (a)原始坯料; (b)带包套的坯料; (c)带包套的锻坯; (d)去除包套的锻坯; (e)锻坯组织的扫描电镜图; (f)锻坯组织的背散射电子衍射图

Fig. 4 Appearance and microstructures of  $\text{Al}_2\text{O}_3_f/\text{TiAl}$  composite manufactured by can-forging (a) initial billet; (b) billet with the can; (c) can-forged pancake with the can; (d) can-forged pancake without the can; (e) scanning electron microscopy image of forging billet microstructure; (f) backscattered electron diffraction image of forging billet microstructure

导致板材表面出现裂纹或过热,影响板材的质量。道次变形量需根据板材的厚度和所需的变形量来确定,以保证板材在轧制过程中能够均匀变形<sup>[71]</sup>。

由于热轧制设备一般为开放式,故为保证变形温度的稳定并防止氧化, TiAl 合金的热轧制几乎都采取包套热轧的方式。包套的存在能够使制备的 TiAl 合金板材表面光滑,对于板材具有明显的保护作用<sup>[72]</sup>。国内外科研人员已针对 TiAl 合金的热轧制工艺进行了较多研究。Wang 等<sup>[21]</sup> 分析不同温度下轧制的 Ti-43Al-9V-0.2Y 合金的组织,发现在 1250 °C 下轧制的合金组织中出现马氏体  $\alpha_2$  和针状  $\gamma$  相的新特征,轧制温度的上升还导致纤维组织的显著变化;相较于 1200 °C 轧制的样品,1250 °C 下轧制样品的强度更高、耐磨性更好。Zhang 等<sup>[71]</sup> 研究轧制变形对 Ti-45Al-9Nb-0.3Y 合金组织和硬度的影响,合金在轧制方向、横向和法线方向上的

组织均为典型的近  $\gamma$  组织;随着轧制变形量的增加,  $\beta(\text{B}_2)$  相的体积分数降低。周海涛等<sup>[73]</sup> 对高 Nb-TiAl 合金进行多步热轧制,确定最优轧制工艺参数为应变速率低于  $0.5 \text{ s}^{-1}$ 、前期道次变形量不高于 25%、变形温度高于 1150 °C;利用优化的工艺参数进行五次大变形轧制后,得到平均晶粒尺寸小于  $5 \mu\text{m}$  的双态组织板材,其强度较高且室温塑性较好。

目前, TiAl 合金轧制板材已用于超音速飞行器和发动机结构部件中<sup>[74-76]</sup>,其整体工艺路线实践最多的仍是铸锭冶金和粉末冶金。在利用铸锭冶金进行 TiAl 合金板材轧制制备方面,德国 GKSS 研究中心<sup>[76]</sup>、奥地利 Plansee AG 公司<sup>[77]</sup> 等机构以及哈尔滨工业大学<sup>[78]</sup>、北京科技大学<sup>[79-80]</sup>、燕山大学<sup>[81]</sup> 等单位均开展系统研究并取得较多的成果。国内目前已制备出的最大板材尺寸为  $1000 \text{ mm} \times$

70 mm×2 mm<sup>[79]</sup>,与国外研制出的 TiAl 合金轧制板材最大尺寸(1800 mm×500 mm×1 mm)<sup>[77]</sup>尚存在差距;轧制板材组织多为双态组织,平均晶粒尺寸在 3.5 μm<sup>[78]</sup>;最优室温抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 1053、911 MPa 和 1.8%<sup>[80]</sup>。

在粉末冶金 TiAl 合金轧制板材制备方面,德国 GKSS 研究中心已研制出尺寸为 750 mm×350 mm×0.25 mm 的高 Nb-TiAl 合金箔材<sup>[76]</sup>,箔材的最小厚度可达到 75 μm<sup>[82]</sup>。在国内,中科院金属所、哈尔滨工业大学等单位也采用此路线轧制出力学性能较好的板材,板材的室温抗拉强度、屈服强度和伸长率分别达到 668、608 MPa 和 2.56%<sup>[83]</sup>。中南大学采用粉末冶金方法,在 1280 °C、总变形量最大 73% 的条件下包套轧制出质量良好、尺寸为 650 mm×370 mm×2 mm 的高 Nb-TiAl 合金薄板材(图 5(a)和(b));板材组织为双态组织,平均晶粒尺寸为 15 μm;轧板室温抗拉强度高达 870 MPa<sup>[84]</sup>。

### 2.3 热挤压

与热轧制相同,热挤压过程中 TiAl 合金在模具内也受到强烈的三向压应力作用,这有助于减少缺陷并优化微观组织。挤压比是衡量热挤压变形量的参数,变形过程中的变形区温度场、速度场以及应变场都会随着挤压比的变化而改变。与其他金属挤压过程不同的是, TiAl 合金的挤压载荷在达到峰值之后未出现明显降低,而是围绕一定的数值波动,这种波动与 TiAl 合金挤压过程中的加工硬化有关<sup>[85]</sup>。除挤压比之外,挤压温度与挤压速度都是挤压过程需要控制的参数。由于热挤压设备通常也呈开放式,无法实现等温加工,因此为了保持温度并避免氧化, TiAl 合金的热挤压工艺也几乎都采取包套热加工的方式。

已有结果显示,热挤压通常能获得更均匀、更细小的 TiAl 合金组织结构<sup>[86]</sup>。相比于热锻造和热轧制,针对 TiAl 合金热挤压制备的研究近些年才取得较大的进展。国内科研团队已对 TiAl 合金包套热挤压工艺展开基础研究并利用该方法制备 TiAl 合金棒材及矩形坯料<sup>[87]</sup>。Liu 等<sup>[88]</sup>通过对 Ti-42Al-6V-1Cr 合金进行包套热挤压和退火处理,获得细小的近片层组织,该组织表现出较高的强度和良好的塑性,其室温抗拉强度和伸长率分别达到 1113 MPa 和 2.4%。Jia 等<sup>[89]</sup>利用 304 不锈钢包套,在 1290 °C 下以 7:1 的挤压比对 TNM 合金进行热挤压,证明在  $\alpha$  相转变温度( $T_\alpha$ )以上挤压控制合金片层取向、提高力学性能的可行性,合金沿挤压方向的抗拉强度和伸长率分别达到 1100 MPa

和 1.26%。Xu 等研究发现, Ti-42Al-9V-0.3Y 合金在 1275~1325 °C 温度下进行热挤压可以获得较好的综合性能<sup>[90]</sup>;由于晶粒的细化、 $\beta$  相的引入和  $\omega_0$  的消除, Ti-45Al-5Nb-0.8Mo-0.3Y 合金经热挤压后力学性能有所改善、热加工性能良好<sup>[91]</sup>。中科院金属所针对 TiAl 合金热挤压包套厚度设计和挤压温度的影响展开研究,发现包套厚度的增加有利于挤压过程中坯料温度的保持<sup>[92]</sup>;挤压温度对 TiAl 合金棒材组织均匀性有较大的影响,在  $\alpha + \gamma$  两相区进行包套热挤压,棒材心部与边缘组织存在明显差异,随着挤压温度的升高,心部变形组织中再结晶片层晶粒体积及其尺寸增大,等轴  $\gamma$  晶粒体积分数减少,在 1280 °C 挤压的棒材经  $\alpha$  单相区热处理后心部与边缘的片层晶粒尺寸相差最小<sup>[93]</sup>。中南大学对热等静压 Ti-47Al-2Cr-0.2Mo 合金坯料进行 1250 °C、1 h 的预热,以 40 mm/s 挤压速度、4.4:1 挤压比进行包套挤压,获得长度超过 700 mm 的矩形截面挤压件(图 5(c))<sup>[94]</sup>。

挤压比的提高有助于铸态组织的破碎细化。北京科技大学闫梦婕<sup>[95]</sup>以烧结态 Ti-48Al 合金为原料,在 1300 °C、9:1 挤压比的条件下对合金进行包套挤压,与锻造态合金相比,合金的室温抗拉强度和伸长率均有所提高,同时还解决了包套热锻过程中合金边缘开裂的问题。孙铁龙<sup>[96]</sup>利用两次热挤压技术成功制备出累积挤压比约 33 的大变形高 Nb-TiAl 合金,棒材尺寸达到  $\phi 40$  mm×2100 mm;挤压后获得以细小  $\gamma$  相为主的新型准近  $\gamma$  组织,其平均晶粒尺寸为 8.9 μm,实现优异的强度和塑性平衡,室温屈服强度为 839.2 MPa、伸长率达 4.82%。北京航空材料研究院刘宏武等<sup>[97]</sup>对 Ti-44Al-5V-1Cr 合金进行了 1250 °C、11:1 挤压比的包套热挤压,获得平均片层尺寸在 12~23 μm 范围内的均匀细小的全片层组织。

在热挤压态 TiAl 合金的微观组织演化方面,刘亮亮等<sup>[98]</sup>发现热挤压态 Ti-47Al-2Cr-2Nb-0.15B 合金的组织由细小等轴晶粒带、残余片层以及形貌不等的  $\gamma$  晶粒构成。刘先锋<sup>[92]</sup>对挤压态 Ti-43.5Al-4Nb-1Mo-0.1B 合金的研究显示,挤压变形后晶界  $\gamma$  相存在颗粒状、块状和长条状三种形态, $\beta_0$  相在挤压过程中被碎化和拉长而呈现纤维状, $\omega_0$  相在变形过程中从  $\beta_0$  相中析出。Qiang 等<sup>[99]</sup>研究 TNM 合金在 1290 °C 热挤压和随后冷却过程中  $\beta$  相的微观结构和晶体学特征,发现在挤压结束到水淬的过渡期,热诱导  $\alpha \rightarrow \beta$  相变与异常  $\alpha$  晶粒生长交织发生,晶内  $\beta$  析出物周围的  $\alpha$  颗粒被异常生

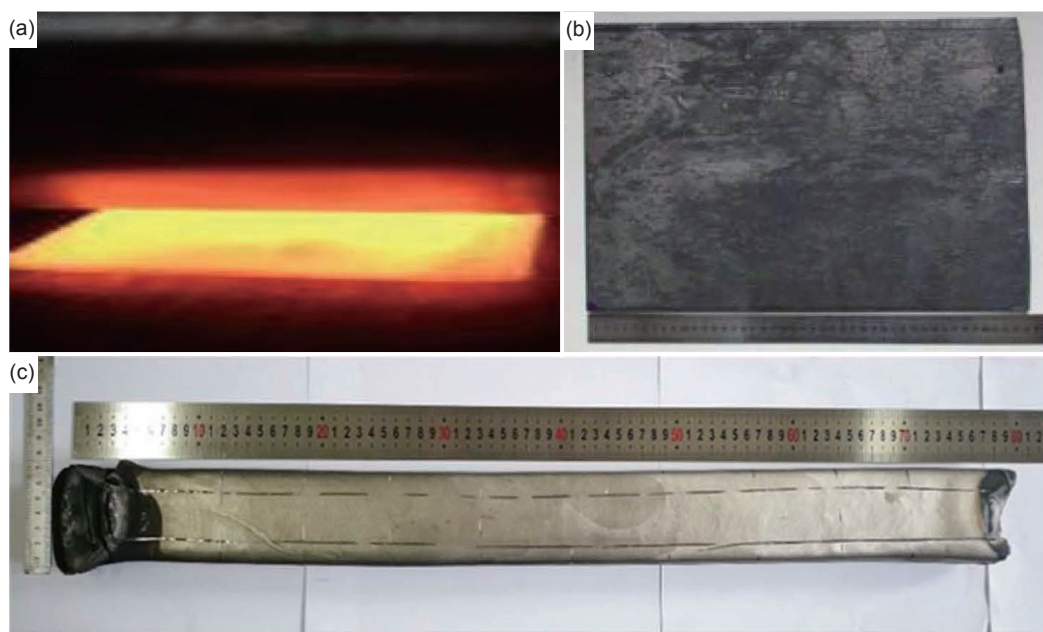


图5 粉末冶金 TiAl 合金包套轧制板材(a)、(b)与包套热挤压矩形坯料的形貌(c)<sup>[94]</sup>

Fig. 5 Appearance of sheet produced by cladding rolling(a), (b) and rectangular billet produced by cladding hot extrusion(c)<sup>[94]</sup> for powder metallurgy TiAl alloy

长的 $\alpha$ 颗粒吞噬后形成 $\beta$ 颗粒。研究还发现<sup>[100]</sup>, 包套热挤压可使 TiAl 合金坯料中形成强烈的织构, 而合金强度和伸长率的同时提高与片层组织的择优取向密切相关。

### 3 变形组织的热处理调控

热处理是改善热成形 TiAl 合金微观组织、提高其力学性能的有效方法之一。热处理工艺的不同会导致 TiAl 合金相成分、组织类型、片层间距、晶粒尺寸等微观组织关键参数的差异, 直接影响合金的强度、塑性、韧性及高温稳定性。TiAl 合金经热处理后可能形成 $\alpha_2/\gamma$ 片层组织与等轴 $\gamma$ 晶粒组成的混合组织; 部分合金中还可能含有少量的 $\beta(B_2)$ 相, 通常以颗粒状形式沿片层界面分布, 可显著提高合金的高温抗蠕变性能, 但过量 $\beta$ 相会引发晶界脆化。因此, TiAl 合金的热处理组织调控主要体现在调整片层组织、等轴 $\gamma$ 晶粒与 $\beta$ 相的比例以及细化片层与晶粒尺寸等方面。

TiAl 合金热处理的难点在于, 由于该合金的温度敏感性高, 在高温下易造成晶粒迅速粗化, 而其相和组织的多样性又会导致微观组织的不均匀, 因此合金的组织调控难度较大。同时, TiAl 合金还具有较大的淬裂性, 在快速冷却过程中易产生裂纹, 这也限制了合金热处理工艺的冷却方式。由于 TiAl 合金成分的变化较大, 目前还没有一个较为统

一的标准热处理制度, 其热处理温度的制定多结合相图在相变点附近设定, 主要的热处理工艺包括单步热处理<sup>[101]</sup>、两步热处理<sup>[102]</sup>、多步热处理<sup>[103]</sup>、循环热处理<sup>[104]</sup>等。

多步热处理和循环热处理常用于铸造态和热等静压态 TiAl 合金的组织调控<sup>[8,105]</sup>。针对经热机械加工后 TiAl 合金的热处理工艺的报道十分有限, 已有文献大多采用单步热处理和两步热处理工艺。徐丽华等<sup>[101]</sup>将两次包套锻造后的 TiAl 合金试样加热到 1310 °C、保温 1 h 后, 得到细小的、由等轴 $\gamma$ 晶粒和片层组织组成的双态组织。Yan 等<sup>[106]</sup>采用单步高温热处理将热挤压 Ti-48Al 合金组织转变为近片层组织, 显著提高了合金的拉伸强度。美国 GE 公司实际应用的粉末冶金 Ti-48Al-2Nb-2Cr 合金, 经热等静压和等温锻造后, 进行 1200 °C/1 h+900 °C/3 h 的高温处理-退火两步热处理, 以调控片层组织与 $\gamma$ 晶粒的比例, 满足不同的性能要求。曾敏<sup>[107]</sup>针对热轧态的粉末冶金 Ti-47Al-2Cr-0.2Mo 合金, 首先进行 1310 °C、保温 0.5 h 的短时高温处理, 随后炉冷至 900 °C 保温 2 h、空冷至室温, 获得了较为细小的全片层组织。中南大学利用淬火-回火两步热处理对挤压态 Ti-47Al-2Cr-0.2Mo 合金的显微组织进行调控, 利用淬火过程中亚稳相的形成以及回火过程中亚稳相的转变, 实现了室温与 800 °C 下强度与伸长率的明显提高<sup>[108]</sup>。

近年来, 研究人员开展了热机械加工 TiAl 合

金的热处理工艺设计,调控出纳米结构从而提升TiAl合金的性能。Zheng等<sup>[15]</sup>对锻造态Ti-43.5Al-4Nb-1Mo-0.1B(TNM)合金进行了1280℃、1h固溶处理以及700、800℃,6h的时效处理,成功获得了最宽片层小于50nm的纳米片层结构;在室温和700℃塑性变形过程中,长周期有序堆垛结构(long period stacking ordering structure, LPSO)形成,与位错滑移和机械孪晶变形的片层结构相比,LPSO结构变形的纳米片层结构表现出更好的室温延展性/屈服强度和更高的高温屈服强度,这为设

计具有优异高温力学性能的TiAl合金开辟一条新的途径。中南大学研究团队采用热处理诱发相变的思路,针对锻造态粉末冶金Ti-48Al-2Nb-2Cr设计了新型的循环热处理、短时热处理和时效处理的多步热处理工艺,成功将纳米结构引入合金中(图6),形成了由纳米片层晶团和等轴纳米 $\gamma$ 晶粒组成的纳米双相结构合金。该合金在室温和700℃下的抗拉强度分别为839、714MPa,力学性能相较于锻造态合金明显提高,在相似成分合金中具有明显的强度优势<sup>[109]</sup>。

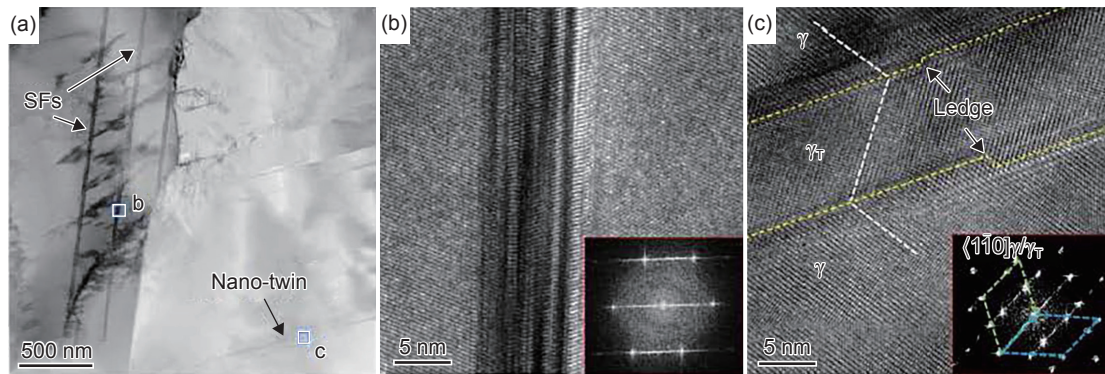


图6 循环热处理后Ti-48Al-2Nb-2Cr合金的透射电镜图<sup>[109]</sup> (a)等轴晶中的复杂堆垛层错区域和纳米孪晶;(b)复杂堆垛层错区域的高分辨透射电镜图及其快速傅里叶变换图;(c)纳米孪晶的高分辨透射电镜图及其快速傅里叶变换图

Fig. 6 Transmission electron microscope images of Ti-48Al-2Nb-2Cr alloys after cycle heat treatment<sup>[109]</sup> (a) complex stacking faults and nano twins in equiaxed grain; (b) high-resolution transmission electron microscope image of stacking faults and its Fourier transform image; (c) high-resolution transmission electron microscope image of a nano twin and its Fourier transform image

此外,在热机械处理组织调控过程中还发现了一些新型的组织结构。Niu等<sup>[110]</sup>对Ti-45Al-6Nb-1Mo合金进行了“ $\alpha$ 挤压工艺”,即将不锈钢包套密封的坯料经1265℃、保温4h后取出快速涂覆玻璃粉润滑,然后以7:1的挤压比进行包套热挤压,挤压棒材再在( $\alpha + \gamma + \beta_0$ )三相区进行1200℃、4h退火,铸态的粗片层组织得到了显著细化,同时还产生了具有优异超塑性变形能力的三相组织。Zheng等<sup>[111]</sup>对锻造态TNM合金进行了固溶-时效两步热处理,触发大量胞状反应,在TNM合金中形成了三相三态和三相双态结构,显著提高合金在室温与800℃下的强度与塑性。上述热机械处理工艺的实践为TiAl合金的组织调控提供了新的思路。

#### 4 热机械处理组织与力学性能

TiAl合金热机械处理工序中热加工的主要目的是细化组织且提高其均匀性,结合后续的热处理,以实现合金微观组织的进一步调控。TiAl合金的典型微观组织包括全片层(full lamellar, FL)、近

片层(near lamellar, NL)、双态(duplex, DP)和近 $\gamma$ (near gamma, NG)组织<sup>[6]</sup>。总的来说,NG组织的综合力学性能较差;DP组织的抗蠕变性和断裂韧性较差,但塑性最好;NL组织的综合力学性能较为平衡;而粗大的FL组织具有较好的抗蠕变性和断裂韧性,但是其强度和塑性较差。

研究表明,TiAl合金的强度与晶粒尺寸的关系符合Hall-Petch公式<sup>[112]</sup>,即材料的强度随着晶粒尺寸的降低而提高。对于FL组织,片层间距与强度之间也满足Hall-Petch关系,而且在晶粒尺寸较小时,片层间距的影响更为显著。这主要是因为TiAl合金的强度主要是由晶界和片层界面控制,而片层界面的面积是晶界的几倍,因此晶界的作用相对较小。晶粒尺寸和片层间距的减小也可以明显改善TiAl合金的塑性。因此,增加片层含量、细化组织对TiAl合金的拉伸性能有利。如前所述,经不同工艺的热机械处理后,TiAl合金的组织细化显著,强度和塑性均有明显提升<sup>[58,78,96,111]</sup>。

在TiAl合金典型组织中,FL组织具有最佳的蠕变抗力,这主要可归因于片层组织中不含 $\gamma$ 晶

粒,并且片层结构内高的晶界密度阻碍了位错运动的缘故<sup>[113]</sup>。经热机械处理后,片层间距和晶粒尺寸的变化对 TiAl 合金抗蠕变性能产生较大的影响<sup>[114]</sup>。尤其是在 FL 或 NL 组织中,片层间距的大小对 TiAl 合金的蠕变抗力至关重要。减小片层间距能有效阻碍位错的运动以及界面上位错的发射,因此片层间距越细小对蠕变抗力越有利。当片层团尺寸大于 100  $\mu\text{m}$  时,片层团尺寸以及  $\alpha_2$ 、 $\gamma$  相的体积分数对蠕变抗力的影响较小<sup>[115]</sup>;当片层团尺寸小于 100  $\mu\text{m}$  时,可能会发生动态再结晶,导致蠕变速率的增加<sup>[113]</sup>。Trofimov 等<sup>[116]</sup>研究了锻造和热处理对  $\beta$  凝固 TiAl 合金蠕变性能的影响,发现随着片层含量的增加和片层间距的减小,蠕变抗力增加,利用这一热机械处理工艺,可以实现良好的拉伸与蠕变性能的平衡。Zhang 等<sup>[117]</sup>利用锻造和固溶处理的热机械处理工艺制备了 TiAl-Nb 合金,蠕变性能测试显示合金在 800  $^{\circ}\text{C}$ 、220 MPa 条件下的蠕变寿命增加至 339 h,热处理后形成的锯齿状互锁结构是其具有较高抗蠕变性的主要原因之一。

综上,热机械处理为 TiAl 合金的组织调控提供了更大的发挥空间,利用热机械处理实现 TiAl 合金组织的细化或调控出新型的组织结构,有望实现 TiAl 合金不同力学性能的平衡,推动其工程化应用进程。

## 5 结束语

TiAl 合金作为新型轻质航空航天材料的候选者,亟需优化性能以推进其工程应用进程。经过国内外研究人员几十年的努力,TiAl 合金已在航空航天和汽车等领域的关键部件上得到应用。热机械处理是进一步调整 TiAl 合金微观组织、实现高性能 TiAl 合金制造的重要环节,主要涉及热塑性变形行为基础理论、不同热加工方法的工艺优化以及后续的热处理组织调控等研究。虽然上述相关领域已取得了重大进展,但尚未成熟,仍有一系列问题有待解决,如针对复合化的 TiAl 合金热加工方法的筛选与参数优化;如何利用 DRX 形核机制与织构演化的关系调控热变形合金的织构强度及各向异性;如何实现低成本 TiAl 合金热机械处理工艺的高效设计;如何设计简单、新型的后热处理工艺调控出细化且相比例合理的微观组织,等等。

未来 TiAl 合金热机械处理领域应主要聚焦以下几方面的研究:

(1)TiAl 合金单一材料性能提升的空间有限,

复合材料韧化作为一种有效的技术,可以大幅度提高 TiAl 合金的强度和韧性,对改善其热加工性能也可起到有益作用。目前针对 TiAl 复合材料热机械加工技术的研究还十分有限。在高通量材料设计的基础上,探索适合于 TiAl 复合材料的热加工和后处理工艺路线,结合复合化和热机械处理技术,有望开发出高温综合性能优异的新型 TiAl 材料。

(2)TiAl 合金大尺寸复杂构件的热加工组织均匀性控制仍是难点,除了工艺参数的优化之外,等温环境的维持以及新型模具材料的开发均是面临的突出问题。结合机器学习方法开展大尺寸 TiAl 合金构件热加工工艺参数的优化设计,以及热加工过程中的组织演变预测,同时开发新型模具材料以有效控制加工温度,有望显著提升大尺寸 TiAl 构件成形过程的可控性和稳定性。

(3)TiAl 合金的生产成本较高,这也是限制其大规模应用的因素之一。在提高合金性能的同时,还要考虑热机械处理的成本控制。因此,需要优化现有工艺、发展低成本热加工和后处理技术,如无包套热加工技术、单步热处理工艺等,以降低生产成本,提高材料利用率,实现 TiAl 合金性能提升与成本控制的平衡。

(4)结合热加工和后续的热处理,进行新型 TiAl 合金微观组织的设计,在引入纳米结构细化 TiAl 合金组织的基础上,调控三相三态或三相双态结构,进一步提升 TiAl 合金的性能。同时,开展 DRX 形核机制与织构演化关系的基础研究,发展针对织构演化调控的热机械处理方法以解决其力学性能各向异性的问题。

(5)利用材料基因工程积累大量的数据从而形成数据库,是加速航空航天 TiAl 合金关键部件工程化进程的关键。针对不同成分 TiAl 合金的热机械处理工艺,未来应融合多学科知识,构建成分-热加工/热处理参数-组织-性能大数据库,实现 TiAl 合金热机械处理工艺的高效筛选和高质量实现,降低研发成本和周期。

目前,在航空领域,热机械处理工艺路线制备的锻造 TiAl 合金已在不同类型的喷气涡扇发动机低压涡轮叶片上投入使用,未来 TiAl 合金低压涡轮叶片的总需求还将不断扩大。同时,TiAl 合金在航空发动机高压压气机叶片等部件的应用也在推进中。在航天领域,由变形 TiAl 合金制造的航天飞行器热防护系统、火箭顶部整流罩以及航天发动机整体叶盘已在推广应用。在汽车领域,由锻造

TiAl 合金制造的汽车柴油发动机涡轮增压器涡轮叶轮以及由热挤压态 TiAl 合金制造的汽车发动机排气阀的需求也在不断增加。可以预见,伴随着航空航天和汽车工业节能、减排、降噪的发展趋势,热机械处理制备的 TiAl 合金在其他构件的应用前景将更加广阔。

### 参考文献:

- [1] GENCO, UNAL R. Development of gamma titanium aluminide ( $\gamma$ -TiAl) alloys: a review[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 929(12): 167262.
- [2] 干梦迪, 种晓宇, 冯晶. 航空航天高温结构材料研究现状及展望[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 46(6): 24-36.  
GAN M D, CHONG X Y, FENG J. Research status and prospects of aerospace high-temperature structural materials[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Sciences)*, 2021, 46(6): 24-36.
- [3] LIU Y, TANG B, HUANG X Y, et al. Microstructural stability and creep properties of middle Nb  $\gamma$ -TiAl alloy with a modulated microstructure[J]. *Intermetallics*, 2022, 151(12): 107733.
- [4] ZHENG G M, TANG B, ZHAO S K, et al. Breaking the high-temperature strength ductility trade-off in TiAl alloys through microstructural optimization[J]. *International Journal of Plasticity*, 2023, 170(11): 103756.
- [5] LIANG Z Q, XIAO S L, YUE H Y, et al. Tailoring microstructure and improving oxidation resistance of an additively manufactured high Nb containing TiAl alloy via heat treatment[J]. *Corrosion Science*, 2023, 220(8): 111287.
- [6] XU R R, LI M Q, ZHAO Y H. A review of microstructure control and mechanical performance optimization of  $\gamma$ -TiAl alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 932(1): 167611.
- [7] 张来启, 葛庚午, 林均品. TiAl 合金热加工研究进展[J]. *精密成形工程*, 2022, 14(11): 1-9.  
ZHANG L Q, GE G W, LIN J P. Research progress in hot working of TiAl alloys[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2022, 14(11): 1-9.
- [8] WANG Q, WU X L, GU L, et al. Microstructure evolution and nano-precipitate of multi-stage heat-treated Ti-45Al-2Nb-2Cr-0.3C alloy[J]. *Intermetallics*, 2024, 171(8): 108365.
- [9] PANOVO D O, SOLOLOVSKY V S, STEPANOV N D, et al. Effect of interlamellar spacing on strength-ductility combination of  $\beta$ -solidified  $\gamma$ -TiAl based alloy with fully lamellar structure[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 862(1): 144458.
- [10] LUO Y F, WANG Y, WANG L, et al. Effect of crystallographic texture on the anisotropy of fracture toughness in as-forged Ti-45Al-7Nb-0.4W-0.1B intermetallics[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1014(2): 178672.
- [11] WANG L, LIANG X P, LIU B, et al. Stacking fault formation in perovskite  $Ti_3AlC$  carbides in a TiAl based alloy during creep at 800 °C[J]. *Scripta Materialia*, 2023, 222(1): 115034.
- [12] 葛庚午.  $\beta$ - $\gamma$  高铌 TiAl 合金的热加工特性、无包套锻造与热处理组织调控[D]. 北京: 北京科技大学, 2022.  
GE G W. Hot working characteristics, forging without canning and microstructure control *via* heat treatment for a  $\beta$ -solidifying high Nb containing TiAl alloy[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2022.
- [13] QIANG F M, KOU H C, LI Y Q, et al. Enhanced strength-ductility synergy of  $\beta$ -solidifying TiAl alloy with preferred lamellar orientation by texturing high-temperature  $\alpha$  phase through hot extrusion[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 885(10): 145626.
- [14] PARK J S, YANG G, KIM S W. Effect of forging routes on the microstructure and mechanical properties of newly-developed Ti-44Al-5.5Nb-0.5W-0.5Cr-0.3Si-0.1C alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 992(7): 174442.
- [15] ZHENG G M, TANG B, ZHAO S K, et al. Novel deformation mechanism of nanolamellar microstructure and its effect on mechanical properties of TiAl intermetallics[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 879(7): 145138.
- [16] 王国田, 龙泽堃, 周西来, 等. 热处理对 Ti-45.5Al-4Cr-2.5Nb 合金组织和性能的影响[J]. *材料导报*, 2024, 38(增刊1): 1-11.  
WANG G T, LONG Z K, ZHOU X L, et al. Effect of the heat treatment on the microstructure and properties of Ti-45.5Al-4Cr-2.5Nb alloy[J]. *Materials Reports*, 2024, 38(Suppl 1): 1-11.
- [17] 刘赵婷, 李明骛, 肖树龙, 等. 准连续网状增强 TiAl 基复合材料的设计与研究[J]. *中国有色金属学报*, 2025, 1550(16): 1-20.  
LIU Z T, LI M A, XIAO S L, et al. Design and investigation of the quasi-continuous network reinforced TiAl matrix composites[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2025, 1550(16): 1-20.
- [18] 高文强, 刘川, 楚玉东, 等.  $\alpha$  凝固 TiAl 合金显微组织细化[J]. *铸造技术*, 2022, 43(12): 1063-1067.  
GAO W Q, LIU C, CHU Y D, et al. Microstructural refinement of  $\alpha$  solidified TiAl alloy[J]. *Foundry Tech-*

- nology, 2022, 43(12): 1063-1067.
- [19] XU R R, LI H, LI M Q. Flow softening mechanism in isothermal compression of  $\beta$ -solidifying  $\gamma$ -TiAl alloy[J]. *Materials & Design*, 2020, 186(1): 108328.
- [20] YANG W G, LI M A, ZHOU T, et al. Deformation behavior and dynamic recrystallization mechanism of a novel high Nb containing TiAl alloy in ( $\alpha$ + $\gamma$ ) dual-phase field[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 945(6): 169250.
- [21] WANG Q B, ZHANG S Z, ZHANG C J, et al. The influence of the dynamic softening mechanism of  $\alpha$  phase and  $\gamma$  phase on remnant lamellae during hot deformation[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 872(8): 159514.
- [22] 任军帅. 粉末冶金 Ti-47Al-2Nb-2Cr 合金高温变形行为及组织演变规律研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.  
REN J S. Hot deformation behavior and microstructure evolution law of PM Ti-47Al-2Nb-2Cr alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [23] CHEN X F, TANG B, LIU Y, et al. Dynamic recrystallization behavior of the Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy during isothermal hot deformation[J]. *Progress in Natural Science*, 2019, 29(5): 587-594.
- [24] GE G W, WANG Z M, ZHANG L Q, et al. Hot deformation behavior and artificial neural network modeling of  $\beta$ - $\gamma$  TiAl alloy containing high content of Nb[J]. *Materials Today Communications*, 2021, 27(6): 102405.
- [25] HE J J, WANG Y, LUO Y F, et al. Effect of Zener-Hollomon parameter on dynamic recrystallization mechanism and texture evolution of extruded Ti-47Al-2Cr-0.2Mo alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2025, 927(4): 147994.
- [26] DU Z H, JIANG S S, ZHANG K F. The hot deformation behavior and processing map of Ti-47.5Al-Cr-V alloy[J]. *Materials & Design*, 2015, 86(12): 464-473.
- [27] HU Q, WANG Y, LV L X, et al. Hot deformation behavior and dynamic recrystallization mechanism of Ti-48Al-2Nb-2Cr alloy with near- $\gamma$  microstructure[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 945(6): 169378.
- [28] WANG G, XU L, WANG Y, et al. Processing maps for hot working behavior of a PM TiAl alloy[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2011, 27(10): 893-898.
- [29] YUAN C H, LIU B, LIU Y, et al. Processing map and hot deformation behavior of Ta-particle reinforced TiAl composite[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2020, 30(3): 657-667.
- [30] PRASAD Y V R K, SESHACHARYULU T. Processing maps for hot working of titanium alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1998, 243(1): 82-88.
- [31] PRASAD Y V R K. Recent advances in the science of mechanical processing[J]. *Indian Journal of Technology*, 1990, 28(1): 435-451.
- [32] SUN Y, HU L X, REN J S. Investigation on the hot deformation behavior of powder metallurgy TiAl-based alloy using 3D processing map[J]. *Materials Characterization*, 2015, 100(2): 163-169.
- [33] XIN J J, ZHANG L Q, GE G W, et al. Characterization of microstructure evolution in  $\beta$ - $\gamma$  TiAl alloy containing high content of niobium using constitutive equation and power dissipation map[J]. *Materials & Design*, 2016, 107(10): 406-415.
- [34] KONG F T, CHEN Y Y, ZHANG D L, et al. High temperature deformation behavior of Ti-46Al-2Cr-4Nb-0.2Y alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 539(3): 107-114.
- [35] TIAN S W, HE A R, LIU J H, et al. Investigation on the microstructure evolution and dynamic recrystallization mechanisms of TiAl alloy at elevated temperature[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 14(9/10): 968-984.
- [36] JIANG H T, TIAN S W, GUO W Q, et al. Hot deformation behavior and deformation mechanism of two TiAl - Mo alloys during hot compression[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 719(3): 104-111.
- [37] LI M A, LI J, ZHOU T, et al. The investigation of microstructure evolution, deformation behavior and processing performance of the high niobium containing TiAl alloys[J]. *Intermetallics*, 2021, 138(11): 107336.
- [38] SINGH V, MONDAL C, KUMAR A, et al. High temperature compressive flow behavior and associated microstructural development in a  $\beta$ -stabilized high Nb containing  $\gamma$ -TiAl based alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 788(6): 573-585.
- [39] LI J B, LIU Y, WANG Y, et al. Constitutive equation and processing map for hot compressed as-cast Ti-43Al-4Nb-1.4W-0.6B alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, 23(11): 3383-3391.
- [40] CHEN R R, MA T F, GUO J J, et al. Deformation behavior and microstructural evolution of hydrogenated Ti44Al6Nb alloy during thermo-compression at 1373-1523K[J]. *Materials & Design*, 2016, 108(10): 259-268.
- [41] LI J B, LIU Y, LIU B, et al. High temperature deformation behavior of near  $\gamma$ -phase high Nb-containing TiAl alloy[J]. *Intermetallics*, 2014, 52(9): 49-56.
- [42] LI J B, LIU Y, LIU B, et al. Effect of Nb particles on the flow behavior of TiAl alloy[J]. *Intermetallics*, 2014,

- 46(3): 22-28.
- [43] 田世伟.  $\beta$ - $\gamma$  TiAl 合金高温热变形及热暴露行为研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.  
TIAN S W. Hot deformation and high temperature exposure behavior of  $\beta$ - $\gamma$  TiAl alloy[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.
- [44] WANG Y, LIU Y, YANG G Y, et al. Hot deformation behaviors of  $\beta$  phase containing Ti-43Al-4Nb-1.4W-based alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 577(8): 210-217.
- [45] JIANG H T, ZENG S W, ZHAO A M, et al. Hot deformation behavior of  $\beta$  phase containing  $\gamma$ -TiAl alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 661(4): 160-167.
- [46] XU X X, KOU H C, YU Y H, et al. Characteristics of lamellar evolution and softening behavior of powder-HIPed TNM alloy during hot compression[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 983(5): 173794.
- [47] LI J, LI M A, HU L, et al. Dynamic recrystallization, phase transformation and deformation mechanisms of a novel Ti-43Al-6Nb-1Mo-1Cr alloy during the isothermal deformation[J]. *Materials Characterization*, 2023, 199(5): 112789.
- [48] SINGH V, MONDAL C, SARKAR R, et al. Dynamic recrystallization of a  $\beta$ (B2)-stabilized  $\gamma$ -TiAl based Ti-45Al-8Nb-2Cr-0.2B alloy: the contributions of constituent phases and Zener-Hollomon parameter modulated recrystallization mechanisms[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 828(7): 154386.
- [49] CHEN X F, TANG B, LIU D, et al. Dynamic recrystallization and hot processing map of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy during the hot deformation[J]. *Materials Characterization*, 2021, 179(9): 111332.
- [50] XU R R, LIU H, LI M Q. Dynamic recrystallization mechanism of  $\gamma$  and  $\alpha$  phases during the isothermal compression of  $\gamma$ -TiAl alloy with duplex structure[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 844(12): 156089.
- [51] LUO Y F, WANG Y, WANG L, et al. Effect of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  fiber on twin intersections-induced dynamic recrystallization in fine-grained TiAl matrix composite[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2024, 172(2): 1-14.
- [52] GOURDET S, MONTHEILLET F. A model of continuous dynamic recrystallization[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(9): 2685-2699.
- [53] HUANG K, LOGE R E. A review of dynamic recrystallization phenomena in metallic materials[J]. *Materials & Design*, 2016, 111(12): 548-574.
- [54] CLEMENS H, MAYER S. Design, processing, microstructure, properties, and applications of advanced intermetallic TiAl alloys[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2013, 15(4): 191-215.
- [55] 王淑云, 李惠曲, 黄朝晖, 等. 等温锻造 Ti-47Al-2Cr-1Nb 合金显微组织细化机理[J]. *航空材料学报*, 2002, 22(1): 51-53.  
WANG S Y, LI H Q, HUANG C H, et al. Mechanism of refining microstructure of isothermally forged Ti-47Al-2Cr-1Nb alloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2002, 22(1): 51-53.
- [56] ZHANG S Z, SONG Z W, ZHANG C J, et al. Fine grained fully lamellar structure acquisition and microstructure characteristics of Ti-44Al-4Nb-4V-0.3Mo-Y alloy[J]. *Materials Characterization*, 2018, 144(10): 141-147.
- [57] HE W W, TANG H P, LIU H Y, et al. Microstructure and tensile properties of containerless near-isothermally forged TiAl alloys[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(12): 2605-2609.
- [58] SALISHCHEV G A, IMAYEV R M, SENKOV O N, et al. Formation of a submicrocrystalline structure in TiAl and  $\text{Ti}_3\text{Al}$  intermetallics by hot working[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2000, 286(2): 236-243.
- [59] APPEL F, BROSSMANN U, CHRISTOPH U, et al. Recent progress in the development of gamma titanium aluminide alloys[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2000, 2(11): 699-720.
- [60] JANSCHKE P. Wrought TiAl blades[J]. *Materials Today*, 2015, 2(Suppl1): S92-S97.
- [61] GE G W, WANG Z M, LIANG S Y, et al. Achievement of forging without canning for  $\beta$ -solidifying  $\gamma$ -TiAl alloy containing high content of niobium[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2021, 36(14): 1667-1676.
- [62] ZHANG L Q, GE G W, LIN J P, et al. Effect of transition metal alloying elements on the deformation of Ti-44Al-8Nb-0.2B-0.2Y alloys[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(9): 14242.
- [63] 王辉, 贾文鹏, 贺卫卫, 等. 包套锻造粉末冶金 TiAl 基合金的高温力学性能[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2013, 18(6): 920-925.  
WANG H, JIA W P, HE W W, et al. High temperature mechanical properties of canned-forged PM TiAl-based alloy[J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2013, 18(6): 920-925.
- [64] NIU H Z, CHEN Y Y, KONG F T, et al. Microstructure evolution, hot deformation behavior and mechanical properties of Ti-43Al-6Nb-1B alloy[J]. *Intermetallics*, 2012, 31(12): 249-256.
- [65] CHENG L, CHANG H, TANG B, et al. Deformation and dynamic recrystallization behavior of a high Nb con-

- taining TiAl alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 552(3): 363-369.
- [66] SU Y J, KONG F T, CHEN Y Y, et al. Microstructure and mechanical properties of large size Ti-43Al-9V-0.2Y alloy pancake produced by pack-forging[J]. *Intermetallics*, 2013, 34(3): 29-34.
- [67] WANG L, LIU Y, ZHANG W, et al. Optimization of pack parameters for hot deformation of TiAl alloys[J]. *Intermetallics*, 2011, 19(1): 68-74.
- [68] 刘咏, 汤慧萍. 粉末冶金钛基结构材料[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2012: 353.  
LIU Y, TANG H P. Powder metallurgical titanium base structural materials[M]. Changsha: Central South University Press, 2012: 353.
- [69] 刘敏. 大尺寸 Ti-43Al-9V-Y 合金板材的组织性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.  
LIU M. Research on microstructure and properties of large-sized Ti-43Al-9V-Y alloy sheet[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [70] SEMIATIN S L, SEETHARAMAN V, WEISS I. Hot workability of titanium and titanium aluminide alloys-an overview[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1998, 243(1/2): 1-24.
- [71] ZHANG S Z, ZHANG C J, HOU Z P, et al. Effects of rolling deformation on microstructure and hardness of Ti-45Al-9Nb-0.3Y alloy[J]. *Journal of Rare Earths*, 2016, 34(2): 197-202.
- [72] 李天瑞, 刘国怀, 于少霞, 等. 直接包套轧制铸态 Ti-46Al-8Nb 合金的组织特征及热变形机制[J]. *金属学报*, 2020, 56(8): 1091-1102.  
LI T R, LIU G H, YU S X, et al. Microstructure evolution and deformation mechanisms by direct hot-pack rolling for as-cast Ti-46Al-8Nb alloys[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2020, 56(8): 1091-1102.
- [73] 周海涛, 侯湘武, 汪彦博, 等. 高 Nb-TiAl 合金的高温变形行为及其板材的性能[J]. *材料研究学报*, 2022, 36(6): 471-480.  
ZHOU H T, HOU X W, WANG Y B, et al. High-temperature deformation behavior and properties of high Nb containing TiAl alloy[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2022, 36(6): 471-480.
- [74] CLEMENS H, KESTLER H. Processing and applications of intermetallic  $\gamma$ -TiAl-based alloys[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2000, 2(9): 551-570.
- [75] 陈玉勇, 叶园, 孙剑飞. TiAl 合金板材轧制研究现状[J]. *金属学报*, 2022, 58(8): 965-978.  
CHEN Y Y, YE Y, SUN J F. Present status for rolling TiAl alloy sheet[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2022, 58(8): 965-978.
- [76] 王子特, 郑功, 祁志祥, 等. TiAl 合金结构、组织、性能与应用[J]. *科学通报*, 2023, 68(25): 3259-3274.  
WANG Z T, ZHENG G, QI Z X, et al. Structures, microstructures, properties, and applications of TiAl alloys[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(25): 3259-3274.
- [77] DAS G, KESTLER H, CLEMENTS H, et al. Sheet gamma TiAl: Status and opportunities[J]. *JOM*, 2004, 56(11): 42-45.
- [78] ZHANG Y, WANG X P, KONG F T, et al. A high-performance  $\beta$ -solidifying TiAl alloy sheet; multi-type lamellar microstructure and phase transformation[J]. *Materials Characterization*, 2018, 138(4): 136-144.
- [79] 沈正章. 高 Nb-TiAl 合金板材制备及组织性能研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2016.  
SHEN Z Z. The investigation of manufacturing, microstructure, properties of high Nb-TiAl alloy sheet[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2016.
- [80] GAO S B, LIANG Y F, YE T, et al. *In-situ* control of microstructure and mechanical properties during hot rolling of high-Nb TiAl alloy[J]. *Materialia*, 2018, 1(9): 229-235.
- [81] 刘宏武. ( $\gamma + \alpha_2 + B2$ )三相 TiAl 合金热加工特性及组织性能研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.  
LIU H W. Hot working, structure and properties of ( $\gamma + \alpha_2 + B2$ ) multiphase TiAl alloy[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.
- [82] 林均品, 陈国良. TiAl 基金属间化合物的发展[J]. *中国材料进展*, 2009, 28(1): 31-37.  
LIN J P, CHEN G L. Development of TiAl intermetallic based compound[J]. *Materials China*, 2009, 28(1): 31-37.
- [83] 徐磊, 柏春光, 王刚, 等. 包覆热轧制备粉末冶金 TiAl 合金板材及热加工行为研究[J]. *钛工业进展*, 2011, 28(5): 17-22.  
XU L, BAI C G, WANG G, et al. Manufacturing of  $\gamma$ -TiAl sheet by hot packed rolling of powder metallurgy preform[J]. *Titanium Industry Progress*, 2011, 28(5): 17-22.
- [84] LIU Y, LIANG X P, LIU B, et al. Investigations on processing powder metallurgical high-Nb TiAl alloy sheets[J]. *Intermetallics*, 2014, 55(12): 80-89.
- [85] 高帆, 李臻熙. 挤压比对 TiAl 合金铸锭挤压过程的影响[J]. *热加工工艺*, 2014, 43(15): 146-150.  
GAO F, LI Z X. Influence of extrusion ratio on extrusion process of TiAl alloy cast ingot[J]. *Hot Working Technology*, 2014, 43(15): 146-150.
- [86] APPEL F, OEHRING M, WAGNER R. Novel design concepts for gamma-base titanium aluminide alloys[J]. *Intermetallics*, 2000, 8(9): 1283-1312.

- [ 87 ] WU X H. Review of alloy and process development of TiAl alloys[J]. *Intermetallics*, 2006, 14( 10): 1114-1122.
- [ 88 ] LIU H W, LI Z X, GAO F, et al. High tensile ductility and strength in the Ti-42Al-6V-1Cr alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 698( 3): 898-905.
- [ 89 ] JIA M Y, QIANG F M, YU Y H, et al. Tailoring lamellar orientation and tensile properties of TNM alloy *via* extrusion[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 28(1/2): 363-370.
- [ 90 ] XU W C, SHAN D B, ZHANG H, et al. Effects of extrusion deformation on microstructure, mechanical properties and hot workability of  $\beta$  containing TiAl alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 571(6): 199-206.
- [ 91 ] XU W C, JUN X Z, HUANG K, et al. Improvement of microstructure, mechanical properties and hot workability of a TiAl-Nb-Mo alloy through hot extrusion[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 705(9): 200-209.
- [ 92 ] 刘先锋.  $\beta$ 凝固 TiAl 合金挤压变形组织与力学性能研究[D]. 沈阳: 中国科学技术大学, 2020.  
LIU X F. Microstructure evolution and mechanical properties of  $\beta$  solidifying TiAl alloy processed by hot extrusion[D]. Shenyang: University of Science and Technology of China, 2020.
- [ 93 ] 曹如心, 叶喜葱, 刘亮亮, 等. 挤压温度对  $\gamma$ -TiAl 基合金组织与性能均匀性的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2020, 40(3): 336-340.  
CAO R X, YE X C, LIU L L, et al. Influence of extrusion temperature on the microstructure and tensile properties homogeneity of  $\gamma$ -TiAl based alloys[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2020, 40(3): 336-340.
- [ 94 ] LUO Y F, LIU B, WANG Y, et al. Effect of texture on mechanical anisotropy of Ti-47Al-2Cr-0.2Mo intermetallics[J]. *Intermetallics*, 2022, 151(12): 107742.
- [ 95 ] 闫梦婕. 粉末冶金 TiAl 金属间化合物的制备与组织性能研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.  
YAN M J. Preparation, microstructure and properties of powder metallurgy TiAl intermetallics compounds[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.
- [ 96 ] 孙铁龙. 大挤压比 Ti-45Al-8Nb-(W, B, Y)合金组织调控及性能研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2024.  
SUN T L. Study on microstructure control and properties of Ti-45Al-8Nb-(W, B, Y) alloy with large extrusion ratio[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2024.
- [ 97 ] 刘宏武, 高帆, 冯像征, 等. TiAl-V-Cr 合金近  $\alpha$  相区的热变形行为[J]. *金属热处理*, 2025, 50(1): 53-58.  
LIU H W, GAO F, FENG X Z, et al. Hot deformation behavior of TiAl-V-Cr alloy near- $\alpha$  phase region[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2025, 50(1): 53-58.
- [ 98 ] 刘亮亮, 刘冬, 刘仁慈, 等. 热处理对 TiAl 合金挤压方棒组织与拉伸性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(增刊1): 95-98.  
LIU L L, LIU D, LIU R C, et al. Effect of heat treatments on microstructure and tensile properties of TiAl alloy extruded below  $T_\alpha$ [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(Suppl1): 95-98.
- [ 99 ] QIANG F M, KOU H C, ZHANG Y D, et al. Thermally-induced  $\alpha \rightarrow \beta$  phase transformation interweaving with abnormal  $\alpha$  grain growth in hot extruded TNM alloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 15(11/12): 2036-2044.
- [ 100 ] YANG G, XU X J, SUN T L, et al. A refined fully lamellar TiAl alloy extruded at  $\alpha$ -phase region: Microstructure and mechanical properties[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 888(11): 145804.
- [ 101 ] 徐丽华, 徐向俊, 林均品, 等. 包套锻造对高 Nb-TiAl 基合金组织的影响[J]. *材料工程*, 2004(8): 21-24.  
XU L H, XU X J, LIN J P, et al. Effect of canned forging on microstructure of high Nb-containing TiAl alloy[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2004(8): 21-24.
- [ 102 ] ZHANG X Y, LI C W, WU M H, et al. A typical pathways for lamellar and twinning transformations in rapidly solidified TiAl alloy[J]. *Acta Materialia*, 2022, 227(4): 117718.
- [ 103 ] YIM S, BIAN H K, AOYAGI K, et al. Effect of multi-stage heat treatment on mechanical properties and microstructure transformation of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 816(6): 141321.
- [ 104 ] SCHWAIGHOFER E, CLEMENS H, MAYER S, et al. Microstructural design and mechanical properties of a cast and heat-treated intermetallic multi-phase  $\gamma$ -TiAl based alloy[J]. *Intermetallics*, 2014, 44(1): 128-140.
- [ 105 ] CAO S Z, HAN J C, WANG H F, et al. Effects of cycle heat treatment on the microstructure and mechanical property of as-cast  $\gamma$ -TiAl alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 857(11): 144053.
- [ 106 ] YAN M J, ZHANG H T, YANG F, et al. The effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of powder metallurgy Ti-48Al alloy[J]. *Metals*, 2024, 14(6): 661.
- [ 107 ] 曾敏. 粉末冶金 TiAl 合金的包套轧制工艺及其热处理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.  
ZENG M. Study on canned forging and heat treatment process of powder metallurgy TiAl alloy[D]. Changsha: Central South University, 2012.

- [ 108 ] SU L, WANG Y, HU Q, et al. Metastable phase transformations and mechanical properties of an as-extruded TiAl-based alloy during two-step heat treatment[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 1005(11): 176135.
- [ 109 ] HU Q, WANG Y, LIU Y, et al. Introducing mechanism of nano planar defect structure in Ti-48Al-2Nb-2Cr alloy through multi-step heat treatment and its effect on mechanical properties[J]. *Materials Characterization*, 2025, 222(4): 114820.
- [ 110 ] NIU H Z, TONG R L, CHEN X J, et al. Rapid decomposition of lamellar microstructure and enhanced hot workability of an as-cast triphase Ti-45Al-6Nb-1Mo alloy *via* one-step alpha-extrusion & annealing[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 801(1): 140438.
- [ 111 ] ZHENG G M, TANG B, ZHAO S K, et al. Evading the strength-ductility trade-off at room temperature and achieving ultrahigh plasticity at 800 °C in a TiAl alloy[J]. *Acta Materialia*, 2022, 225(2): 117585.
- [ 112 ] KIM Y W, DIMIDUK D M. Progress in the understanding of gamma titanium aluminides[J]. *JOM*, 1991, 43(8): 40-47.
- [ 113 ] MARUYAMA K, YAMAMOTO R, NAKAKUKI H, et al. Effects of lamellar spacing, volume fraction and grain size on creep strength of fully lamellar TiAl alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1997, 239/240(12): 419-428.
- [ 114 ] TENG Y, LIN S, LIANG Y F, et al. Precipitation behavior of  $\omega_0$  phase and texture evolution of a forged Ti-45Al-8.5Nb-(W, B, Y) alloy during creep[J]. *Materials Characterization*, 2018, 136(2): 41-51.
- [ 115 ] PARTHASARATHY T A, KELLER M, MENDIRATTA M G. The effect of lamellar lath spacing on the creep behavior of Ti-47 at% Al[J]. *Scripta Materialia*, 1998, 38(3): 1025-1031.
- [ 116 ] TROFIMOV D M, ROFIMOV V M, IMAYEV R M. Influence of upset forging and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of a new  $\beta$ -solidifying  $\gamma$ -TiAl alloy[J]. *Intermetallics*, 2023, 163(12): 108078.
- [ 117 ] ZHANG S K, TIAN S G, LI G Y, et al. Creep behavior and effect factors of a TiAl-Nb alloy at high temperature[J]. *Progress in Natural Science*, 2021, 31(6): 477-485.

---

收稿日期: 2025-05-20; 录用日期: 2025-07-10

通讯作者: 刘咏(1973—), 男, 博士, 教授, 研究方向为粉末冶金高温结构材料, 联系地址: 湖南省长沙市岳麓区麓山南路 932 号中南大学岳麓山校区粉末冶金研究院(410083), E-mail: [yonliu@csu.edu.cn](mailto:yonliu@csu.edu.cn)

( 本文责编: 高 磊 )