

合金成分对 TiAl 合金热变形加工影响的研究进展

张宇¹, 王晓鹏¹, 孔凡涛¹, 陈玉勇^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学 金属精密热加工国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

(2. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: TiAl 合金的热加工(锻造、热挤压、板材轧制等)窗口窄、高温变形能力差、室温脆性大等成为限制其应用的关键因素, 本文主要综述了合金成分对 TiAl 合金热变形加工以及超塑性成形影响等方面的研究现状, 从 TiAl 合金的晶体结构、 β 相含量、显微组织细化、热变形激活能 4 个方面探讨了合金成分对 TiAl 合金热变形加工的影响, 并指出合金化方式提高 TiAl 合金热变形加工能力应该遵循的几点原则, 以及 TiAl 合金热变形加工的未来发展趋势。

关键词: 合金成分; TiAl 合金; 热变形加工; 超塑性

中图分类号: TG146.2⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)11-3570-07

TiAl 合金作为一种新型的轻质高温结构材料, 具有低密度 ($3.9\sim 4.2\text{ g/cm}^3$)、高熔点、高强度、高比模量、良好的抗氧化性和高温蠕变性能等优点, 在航空航天飞行器和汽车发动机等高温结构零部件应用方面得到了广泛的关注^[1-3]。2007 年由美国国家航空航天局 (NASA)、奥地利空间局和 Pratt&Whitney 等机构共同合作, 采用 TiAl 合金材料成功制备了高超声速推进系统结构, 与 Ni 基高温合金制备的构件相比, 整体结构减重 25%~30%, 并表示 21 世纪 TiAl 合金在航空航天飞行器领域具有巨大的应用潜力^[4]。经过多年的研究, 在 TiAl 合金冶金和热加工方面取得了巨大的进步, 美国 GE 公司首先将 4822 铸造合金(Ti-48Al-2Cr-2Nb)实现工业化生产, 目前 Rolls-Royce 已经将 Ti-45Al-2-2-XD 合金应用到不同的航空发动机组件, 比如发动机定子叶片、低压涡轮叶片等^[5]。由德国 GKSS 中心开发的 TNB 合金 (Ti-(42-45)Al-(5-10)Nb-(0-0.5)B) 和奥地利 Plansee 公司研制的 γ -MET 合金 (Ti-45Al-(5~10)Nb-X(B, C)) 具有较好的高温性能, 并制备了 1000 mm \times 450 mm \times 1 mm 和 750 mm \times 350 mm \times 0.25 mm 的大尺寸 TiAl 合金板材^[4]。

TiAl 合金中金属键和共价键共存, 使得 TiAl 合金同时兼具陶瓷的性能, 在高温下具有很好的蠕变性能和抗氧化性能, 但是 TiAl 合金的热加工窗口窄, 高温变形能力差, 限制了 TiAl 合金的工程应用推广。为了攻克这些难题, 国内外工作者致力于通过合金化方式来提高 TiAl 合金的热变形加工(锻造、轧制、挤压以

及超塑性成形)性能的研究, 开发了多种具有优异性能的 TiAl 合金, 并取得了突破性的进展。

本文从晶体结构、 β 相含量、显微组织细化、热变形激活能 4 个方面系统总结了合金成分对改善 TiAl 合金热变形加工能力的作用机制以及合金成分对 TiAl 合金超塑性的影响, 并提出了合金化提高 TiAl 合金热变形加工能力应该遵循的几点原则, 以及 TiAl 合金热变形加工的未来发展趋势。

1 合金成分对 TiAl 合金热加工的影响

目前国内外研究者主要通过优化热加工工艺参数和合金化 2 种手段来提高 TiAl 合金的热加工性能, 采用合金化方式提高 TiAl 合金热加工性能主要体现在合金成分对 TiAl 合金的晶体结构、 β 相含量、显微组织细化、热变形激活能等几个方面的影响。

1.1 晶体结构

TiAl 合金在室温下主要由 γ 相组成, 含有少量的 α_2 相(含量 5%~20%之间)可以使 TiAl 合金获得较好的综合性能。TiAl 合金中的 α_2 相具有 DO₁₉ 六方晶系结构, 该相在室温下为长程有序结构 (α_2 相), 高温下转变为无序结构 (α 相), α_2 单相合金的高温变形能力很差; 而 γ 相具 L1₀ 面心四方结构, 其面心立方结构中的 (001) 面交替分别被 Ti 和 Al 原子占据, 纯 γ 相的 TiAl 合金硬度很高, 室温塑性差, 很难进行机械加工, 限制了 TiAl 合金在实际工程中的应用。合金化方式通过改变 TiAl 合金的电子结构、结合键类型以及有

收稿日期: 2016-11-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51371064, 51471056); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划) (2011CB605502)

作者简介: 张宇, 女, 1988 年生, 博士生, 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001, E-mail: zhangyu88309@163.com

序化程度,提高 TiAl 合金的热加工性能。

纯 γ 相 c/a 的轴比为 1.02,随着 Al 含量的不同 c/a 的轴比在 1.01~1.03 之间变化, c/a 值和单胞体积的降低能增强晶体的各向同性,减弱合金中共价键结合强度,降低普通位错 $1/2\langle 110 \rangle$ 与超位错 $\langle 101 \rangle$ 之间的可动性差异,有利于 TiAl 合金高温塑性的改善。合金元素一般会占据 γ -TiAl 点阵结构的 Ti 位或者 Al 位, Cr、V、Y、Zr、Nb 等倾向于占 Ti 位, Fe、Co、Pb、Tc、Ru、Rh 倾向于占 Al 位,合金元素原子半径的差异导致 γ 相晶格产生畸变,点阵常数也发生变化,同时合金元素的占位可以影响相平衡、堆垛层错能、APB 能、孪晶界面能以及对位错运动的抵抗能力^[6]。有研究报道,加入 1%~3% (原子分数)的 Cr 元素可以降低 γ 相的单胞体积和 c/a 的比值, Ti-Al 之间的共价键结合强度减弱,可以有效提高 TiAl 合金的高温变形能力,而 Nb 元素使 c/a 的轴比略有升高,单胞体积略微增大^[7]。另外, V、Cr、Mn 等元素的添加使 TiAl 合金中的电子浓度升高,成键的电子云的球化程度增大,金属键作用增强,使合金整体显示出很好的金属性能,提高了 TiAl 合金的高温变形能力,但是大量的 V、Cr、Mn 等合金元素会使 TiAl 合金的抗氧化能力急剧下降。因此,提高 TiAl 合金高温变形能力的同时,合金元素对 TiAl 合金性能的影响也不容忽视。

1.2 β 相含量

Clemens^[1]指出设计具有优异热加工性能的 TiAl 合金的主要途径之一是通过添加合金元素引入高温 β 塑性相, β - γ TiAl 合金的热加工性能要优于传统的 TiAl 合金。 β 相提高 TiAl 合金的高温变形能力主要体现在以下几个方面:(1)高温无序的 β 相具有体心立方结构,含有大量独立的滑移系,位错更容易进行滑移和攀移,有利于合金的塑性变形;(2) β 相主要分布在晶界处,在变形过程中抑制晶粒长大,细化 TiAl 合金的显微组织;(3)三角晶界处的 β 相可以增加晶粒间的结合强度,同时起到润滑的作用,协调 TiAl 合金高温变形,减少微裂纹和显微孔洞的产生^[8];(4)高温变形过程中发生 $\beta \rightarrow \alpha_2$ 和 $\beta \rightarrow \gamma$ 相变,释放晶界处变形应力,降低 TiAl 合金的流动应力峰值,利于动态再结晶的发生,提高合金的变形能力^[9, 10]。从 TiAl 合金二元相图可知,当合金中 Al 含量低于 44%,合金的凝固过程中通过 β 相区,可以有效避免合金组织中晶粒粗大和偏析严重的现象,但 Al 含量的降低导致合金的抗氧化能力明显下降,为了同时保证 TiAl 合金的抗氧化性能 (Al 含量不能过低),一般通过添加合金元素扩大 β 相区来改善合金的高温变形能力,此类合金元素称为 β 相稳定元素^[10]。

合金元素对 TiAl 合金的相变温度有直接的影响,某些合金元素使 β 相转变温度降低,并使 β 相区向高 Al 含量区域扩大,同时 α 相区减小;一些合金元素使 TiAl 合金中出现了 $(\alpha+\beta+\gamma)$ 三相区或 $(\beta+\gamma)$ 双相区,含有 β 相区的合金具有优异的高温变形能力,这对 TiAl 合金的热加工具有重大的意义^[11, 12]。目前已开发的 β 相稳定元素有 Nb、Fe、W、Ta、Mo、Cr、Mn、V 等,不同元素的 β 相稳定能力不同^[10, 11]。W 元素的 β 相稳定能力要优于 Nb 元素和 Mn 元素,图 1 为添加 W、Nb、Mn 的三元相图。添加少量的 W 就能得到 $(\alpha+\beta+\gamma)$ 三相区, TiAl 二元平衡相图同样显示 (如图 2a 所示),添加 2% 的 W 使 TiAl 合金在 900~1400 °C 温度范围区间都含有 β 相,而添加 2% 的 Nb, β 相只出现在 1200 °C 以上的高温区和 Al 含量低于 40% 的区域^[13]; Mo 元素 β 相稳定能力也高于其他合金元素,元素稳定能力的差异可以采用 Mo 当量公式表示: Mo (原子分数, %) = Mo + (V/1.5) + (Cr/1.5) + (Fe/1.5) + (Cu/1.5) + (Nb/1.5) ^[14, 15]。图 2b 为 β 相稳定元素和 Al/(Al+Ti)对 β 相含量的影响。表明 Cr、Nb、Mo 3 种元素具有较强的 β 相稳定能力,并且 β 相体积分数

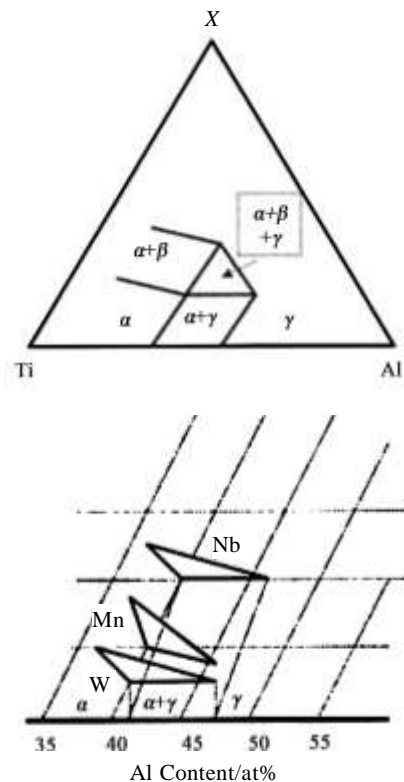


图 1 W、Nb、Mn 元素对 TiAl 合金中 $(\alpha+\beta+\gamma)$ 相区影响的三元相图

Fig.1 Schematic diagram showing the location of the three-phase $\alpha+\beta+\gamma$ phase field in ternary Ti-Al-X alloy (X=W, Nb, Mn)^[13]

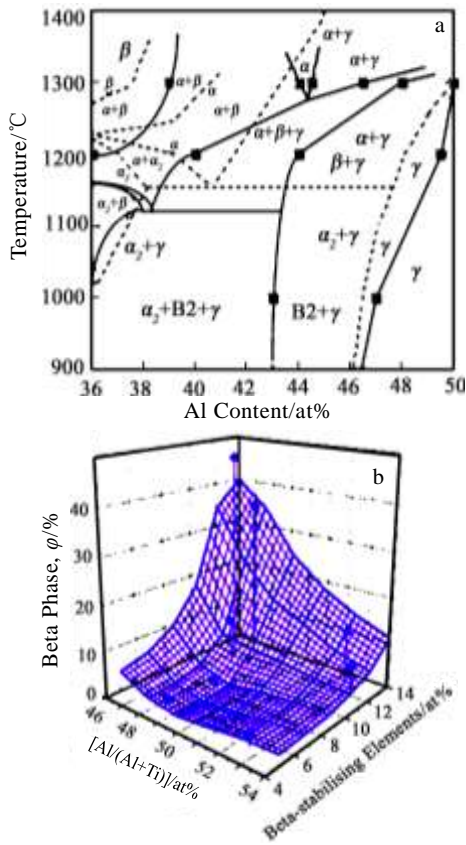


图 2 加入 2% 合金元素的 Ti-Al-TM 合金二元平衡相图 (实线为 Ti-Al-2%W, 虚线为 Ti-Al-2%Nb) 及 β 相稳定元素和 Al/(Al+Ti) 对 β 相含量的影响

Fig.2 Isothermal section through the equilibrium diagram Ti-Al-TM at 2% TM. (heavy lines show diagram for Ti-Al-2% W, while dotted lines show phase field limits for Ti-Al-2% Nb) (a); percentage of β phase formed in the considered alloys as a function of β -stabilizing elements and Al/(Al+Ti) ratio (b)^[13, 14]

随合金元素含量的增加而增加^[14]。Clemens 采用 CALPHAD 计算方法分析了 Nb、Mo 元素含量对 β 相与温度之间关系的影响, Nb、Mo 元素使合金 β 相含量明显增加, 1275 °C 以上随着温度的升高 β 相含量升高, 使 Ti-43Al-4Nb-1Mo-0.1B 合金的热加工窗口变宽, 该合金采用传统的锻造技术就能进行热加工, 而不需要特殊的等温锻造或包套锻造^[16]。

国内外研究工作者通过添加 β 相稳定元素获得了具有优异热加工性能的 TiAl 合金。B. Liu^[9]通过添加低成本的 β 相稳定元素 Mo 和 Fe 成功制备了成分为 Ti-45Al-3Fe-2Mo 的 TiAl 合金板材, 该合金在 900 °C 同样具有很好的高温变形能力。奥地利 PlanseeAG 开发的 TNM 合金 (Ti-(42-44Al)-(3-5)Nb-(0.1-2) Mo-(0.1-0.2)B) 是典型的 β - γ TiAl 合金, 该合金具有很宽的热

加工窗口^[16]。另外, 日本三菱重工、德国 Leistriz 公司以及 GKSS 已成功制备出 β - γ TiAl 合金的发动机锻造叶片^[17, 18] (如图 3 所示)。目前, 如何消除室温下 TiAl 合金中的 B2 相 (室温下 β 相转变为 B2 相, B2 相为脆性相), 提高 TiAl 合金的室温塑性成为急需攻克难题。

1.3 显微组织细化

TiAl 合金属于难加工材料, 铸态组织表现出低的热塑性变形能力, 但当原始组织晶粒均匀细小时, 峰值流变应力降低, 加工硬化和流变软化更易达到平衡, 再结晶更完全 (如图 4 所示), 有效降低了 TiAl 合金的热变形温度, TiAl 合金表现出很好的高温塑性变形能力^[19]。一方面细小的晶粒缩短了位错的滑移路径, 晶粒越细小含有的晶界越多, 有利于晶界的滑移和晶粒的转动, 在相同外力的作用下, 细小晶粒的内部和晶界附近的应变相差较小, 在断裂之前可以承受较大的变形量, 使 TiAl 合金具有优异的高温变形能力; 另一方面, TiAl 合金在高温变形过程中主要靠动态回复和动态再结晶来释放积聚的能量和应力以减少合金在变形过程中微裂纹的产生, 原始晶粒越细小, 晶界越多, 动态再结晶的驱动力越大, 形核效率越高。

B、C、Si、Y 等合金元素可以有效细化晶粒, 减小 TiAl 合金的层片间距^[20]。哈尔滨工业大学研究的 Ti-43Al-9V-Y 合金中 Y 元素使组织明显细化, 层片间



图 3 PW1134G 发动机的低压涡轮 3 级锻造叶片及 E3E 发动机的高压压气机 7、8、9 级锻造叶片

Fig.3 Forged low pressure turbine blade stage 3 for PW1134G (a); high pressure compressor blades stages 7, 8, 9 of E3E (b)^[18]

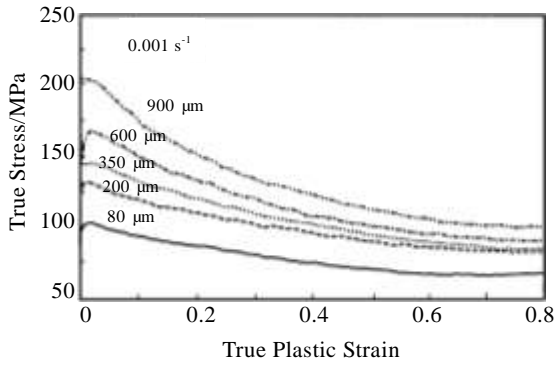


图 4 Ti-45.5Al-2Nb-2Cr 合金在温度为 1093 °C、应变速率为 0.001 s⁻¹ 的真应力-真应变曲线

Fig.4 True Stress-strain curves of Ti-45.5Al-2Nb-2Cr obtained by upset testing at 1093 °C and strain rate of 0.001 s⁻¹[19]

距减小; 添加 0.3% (原子分数) 的 Y 元素 Ti-45Al-5Nb 合金的层片间距由原来的 0.47 μm 降低到 0.2 μm (如图 5 所示), 流变峰值应力降低, 合金的热加工能力得到明显提高, 另外 Y 元素易与 TiAl 合金中的 O 元素结合生成 Y₂O₃, 降低 TiAl 合金的氧含量, 进一步改善了合金的高温变形能力^[21, 22]。B 元素在 TiAl 合金中一般以硼化物的形式存在, 在变形过程中, 硼化物破碎成细小的颗粒, 在晶界处起到钉扎的作用, 抑制晶粒的进一步长大, 同时为再结晶晶核提供质点, 降低形核能, 促进动态再结晶的进行^[23]。另外, 合金化元素对 α 相转变温度也有影响, α 相转变温度的确定对 TiAl 合金热加工参数的制定具有一定的指导意义。TiAl 合金一般在 (α+γ) 双相区进行锻造、轧制或挤压, T_α 转变温度的降低直接导致热加工温度或热处理温度降低, 在相对较低的温度进行高温变形和热处理可以抑制晶粒长大, 细化显微组织, 从而提高 TiAl 合金的综合性能。

1.4 热变形激活能

TiAl 合金的高温塑性变形是一个热激活的过程, 只有当变形温度高于脆/韧转变温度并且应变速率相对较低的情况下, 才能实现 TiAl 合金的安全变形, 获得高质量的 TiAl 合金零部件。TiAl 合金的热塑性变形遵循 Zener-Hollomon 关系^[23-26], 即

$$Z = \dot{\epsilon} \cdot \exp(Q/RT) \quad (1)$$

式中, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率 (s⁻¹), Q 为变形激活能 (kJ mol⁻¹), R 为摩尔气体常数, 8.314 J / (mol K), T 为绝对温度 (K)。Z 值越小, 合金的变形能力越好, 从公式 (1) 中可以看出, Z 值不仅与合金的应变速率和温度有关, 而且合金的显微组织和成分对激活能有很大的影响, 直接影响了 Z 参数的变化。H. Y. Kim^[27]等研究发现,

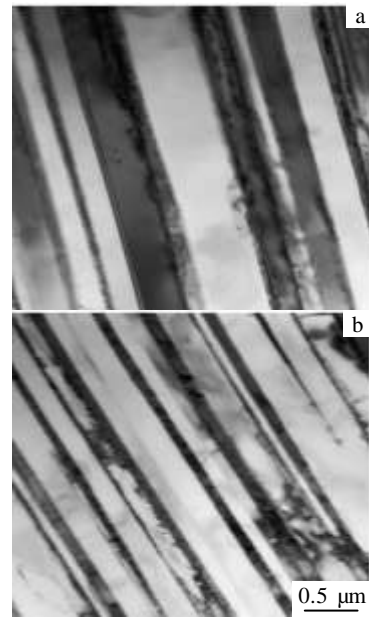


图 5 TiAl 合金层片结构 TEM 照片

Fig.5 TEM images of lamellar microstructure of TiAl alloys: (a) Ti-45Al-5Nb and (b) Ti-45Al-5Nb-0.3Y^[21]

TiAl 合金的变形激活能一般处于 400~600 kJ mol⁻¹ 范围内, 远高于 Fe-Si-Al 合金的变形激活能值 (约为 410 kJ mol⁻¹)。因此, TiAl 合金的高温变形相当困难。研究表明, Nb、W 等高熔点元素的固溶强化作用导致合金的激活能增加, 变形困难; V 元素的作用恰恰与 Nb 元素相反, V 的固溶强化作用较弱, 激活能降低, 有利于 TiAl 合金的高温变形; 少量 Si、C、B 等元素的添加, 可以引入 SiO₂、Ti₃AlC、TiB₂ 等颗粒相, 在高温变形过程中, 这些颗粒相作为动态再结晶的形核质点, 促进动态再结晶的发生, 降低了热变形激活能^[28]。

近几年, 国内外研究工作者在 TiAl 合金激活能方面做了大量的研究工作 (如表 1 所示), 表 1 数据显示不同成分的 TiAl 合金激活能明显不同, 高 Nb-TiAl 合金相对于其他成分合金的激活能高出很多, 说明 Nb 元素对 TiAl 合金的热加工性能有不利的影响^[25, 26]。TiAl 合金的热变形激活能除了与合金成分有关之外, 合金的显微组织、相组成分数等也对变形激活能有很大的影响, 比如均匀细小的晶粒有利于协调 TiAl 合金的高温变形, 激活能降低等等。到目前为止, 关于合金成分对 TiAl 合金热激活能影响的机制未见详细报道。

2 合金成分对 TiAl 合金超塑性的影响

表 1 不同成分 TiAl 合金的激活能

Table 1 Activation energy (Q) of TiAl alloys

Alloy	Preparation method	$Q/kJ\ mol^{-1}$
Ti-45Al-2Nb-1.5V-1Mo-Y ^[24]	IM	370
Ti-45Al-5Nb-0.3Y ^[29]	IM	399.5
Ti-45Al-7Nb-0.3W ^[26]	PM	414
Ti-45Al-7Nb-0.4W ^[25]	PM	420
Ti-43Al-9V-Y ^[30]	PM	342.27

Note: IM-ingot metallurgy; PM-powder metallurgy

超塑性是指材料在一定的温度和应变速率条件下显示很大伸长率而不产生缩颈的现象，具有大变形、小应力、易成形、设计自由度大、残余应力小以及材料利用率高等特点，是加工成形 TiAl 合金复杂件的有效途径之一^[31, 32]。合金成分对 TiAl 合金超塑性的影响主要体现在以下几个方面。

2.1 β 相含量对 TiAl 合金超塑性的影响

目前，TiAl 合金的超塑性已从传统的双相 γ -TiAl 合金过渡到新型的 β - γ TiAl 合金。 β 相有较多的可动滑移系，位错在 β 相中的滑移和攀移比在 γ 晶粒中更容易，有利于高温变形过程中的晶界滑移；晶粒内特有的亚组织结构使 β 相在变形过程中优先动态再结晶细化； β 相的存在有利于协调周围晶粒的转动，减小应力集中，推迟孔洞和裂纹的产生，保证 TiAl 合金超塑性变形的顺利进行^[31, 33, 34]。Mo、Nb、Cr 等 β 相稳定元素不仅提高了 TiAl 合金中的 β 相含量，其中含 Mo 元素的 β - γ TiAl 合金，由于 Mo 元素过饱和固溶导致 β 相在超塑性变形过程中发生 $\beta \rightarrow \alpha + \gamma$ 相变分解，并且 β 相首先发生动态再结晶软化，释放一定的能量，减小应力集中，促进合金超塑性变形^[35, 36]。国内哈尔滨工业大学研究的 β - γ TiAl 合金 Ti-43Al-4Nb-2Mo-0.5B 的延伸率可以达到 405%，应力敏感指数为 0.52^[37]。中南大学和上海交通大学共同合作研究的 β 型 Ti-48Al-Cr-Mo 合金的最高延伸率达到 533%，最大应力敏感指数为 0.78^[38-41]。国外 Plansee AG 和俄罗斯科学院超塑性问题研究所采用超塑性方法成形出 TiAl 合金波形件和盒形件(如图 6 所示)，但是到目前为止，尚未报道利用超塑性成形体积零件的研究和应用的报道^[2, 42]。

2.2 析出相对 TiAl 合金超塑性的影响

合金元素 (B、Y、C、Si 等) 除了细化晶粒作用之外，形成的 TiB_2 、 Y_2O_3 等化合物作为再结晶的形核质点，促进高温动态再结晶的发生，松弛晶界处的应力集中，同时抑制晶粒的长大，推迟孔洞和微裂纹的产生，提高 TiAl 合金的延伸率，保证 TiAl 合金超塑性变形的顺利进行^[31, 43]。例如 TiAl-Cr-Si 合金中含 Si

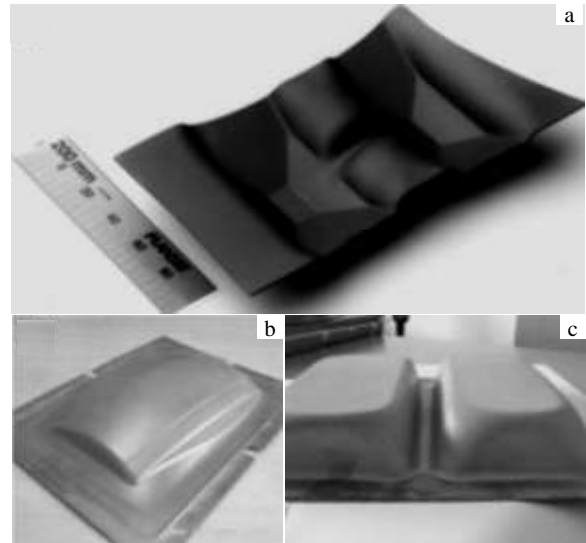


图 6 超塑性成形的 TiAl 合金

Fig.6 Waveform (a) and shell (b,c) parts of TiAl alloy fabricated by superplastic forming^[2,42]

的铝化物能有效阻止孔洞的形成和长大，提高合金的塑性，降低超塑性成形的温度。但当析出相含量过高或与基体界面结合度较差时，随着变形量的增加，孔洞很容易在界面处产生并快速扩展，最终导致材料断裂(如图 7 所示)^[37]。

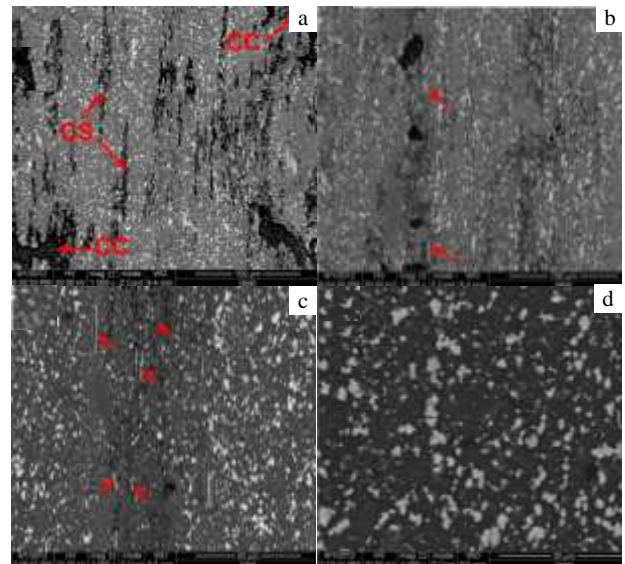


图 7 TiAl 合金超塑性断裂孔洞形貌

Fig.7 Cavity morphologies of specimens strained to failure: (a) cavity stringers and cavity coalescence at fracture tip; (b) cavities away from the fracture tip; (c) cavity initiation; (d) the deformed microstructure prior to cavity initiation (the red arrows indicate TiB particles)^[37]

2.3 显微组织对 TiAl 合金超塑性的影响

均匀细小的等轴晶组织是实现 TiAl 合金低温、高应变速率超塑性成形的有效途径之一^[31, 34, 40, 44-47]。当晶粒尺寸达到亚微米级可以有效降低 TiAl 合金的韧性-脆性转变温度, 实现 TiAl 合金在较低的温度和较高的应变速率下的超塑性成形^[43, 47]。Si、C、B 等元素可以有效细化 TiAl 合金的显微组织、晶界和相界变得等轴化, 有利于超塑性变形过程中晶界的迁移和晶粒的转动, 减少孔洞的形成^[20, 23, 48]。目前, 还采用热挤压、热锻和机械合金化等手段获得均匀细小的显微组织, 提高 TiAl 合金超塑性变形能力^[40]。

3 结 语

合金化提高 TiAl 合金的热变形加工能力应遵循以下几点原则:

(1) 避免包晶区, 保证合金的凝固路径经过 β 相区。

(2) 添加一定量 β 相稳定元素 (Nb、W、Mo 等), 增加高温无序的 β 相含量, 提高 TiAl 合金的热加工性能。

(3) 添加的合金元素有利于缩小 α 相区, 保证合金在 $(\alpha+\gamma)$ 双相区进行变形, 避免高温变形升温时发生 $\alpha+\gamma\rightarrow\alpha$ 而导致晶粒粗化的现象。

(4) 添加少量的 Y、B、Si、C 等元素细化合金显微组织, 提高 TiAl 合金的热变形加工能力。

合金化是提高 TiAl 合金的高温变形能力的有效途径之一, 通过合理控制合金成分含量, 能够获得具有优异热加工性能的 TiAl 合金, 在一定程度上解决了 TiAl 合金热加工窗口窄、高温变形能力差等问题。但要实现 TiAl 合金的广泛应用, 还需解决 TiAl 合金室温塑性差等问题, 突破 TiAl 合金薄板轧制的技术难点, 使 TiAl 合金走向成熟的工业发展道路。

参考文献 References

- [1] Clemens H, Mayer S. *Advanced Engineering Materials*[J], 2013, 15(4): 191
- [2] Imayev V, Imayev R, Safiullin R *et al. Авиационно-космическая Мехника и Мехнология*[J], 2005 (5): 17
- [3] Loria E A. *Intermetallics*[J], 2000, 8(9-11): 1339
- [4] Das G, Kestler H, Clemens H *et al. Journal of Metals*[J], 2004, 56(11): 42
- [5] Voice W. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*[J], 1999, 71(4): 337
- [6] Shu S L, Qiu F, Tong C Z *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2014, 617: 302
- [7] Kawabata T, Tamura T, Izumi O. *Metallurgical Transactions A*[J], 1993, 24(1): 141
- [8] Li J B, Liu Y, Liu B *et al. Intermetallics*[J], 2014, 46: 22
- [9] Liu B, Liu Y, Qiu C Z *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 640: 298
- [10] Qiu C Z, Liu Y, Huang L *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2012, 22(11): 2593
- [11] Cheng T T, Willis M R, Jones I P. *Intermetallics*[J], 1999, 7(1): 89
- [12] Schwaighofer E, Clemens H, Mayer S *et al. Intermetallics*[J], 2014, 44: 128
- [13] Muñoz-Morris M A, Gil I, Morris D G. *Intermetallics*[J], 2005, 13(9): 929
- [14] Brotzu A, Felli F, Pilone D. *Intermetallics*[J], 2014, 54 : 176
- [15] Qiu C Z, Liu Y, Huang L *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2012, 22(3): 521
- [16] Clemens H, Wallgram W, Kremmer S *et al. Advanced Engineering Materials*[J], 2008, 10(8): 707
- [17] Kestler H, Clemens H. *Titanium and Titanium Alloys*[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, 2005: 351
- [18] Janschek P. *Materials Today: Proceedings*[J], 2015, 2(S1): S92
- [19] Seetharaman V, Semiatin S L. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2002, 33(12): 3817
- [20] Zhou C X, Liu B, Liu Y *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2014, 24(6): 1730
- [21] Chen Y Y, Li B H, Kong F T. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2008, 457(1-2): 265
- [22] Chen Y Y, Kong F T, Han J C *et al. Intermetallics*[J], 2005, 13(3-4): 263
- [23] Wang Y, Liu Y, Yang G Y *et al. Materials Science and Engineering: A*[J], 2013, 577: 210
- [24] Niu H Z, Chen Y Y, Xiao S L *et al. Intermetallics*[J], 2011, 19(12): 1767
- [25] Liu B, Liu Y, Zhang W *et al. Intermetallics*[J], 2011, 19(2): 154
- [26] Li J B, Liu Y, Liu B *et al. Intermetallics*[J], 2014, 52: 49
- [27] Kim H Y, Sohn W H, Hong S H. *Materials Science and Engineering: A*[J], 1998, 251(1): 216
- [28] Goetz R L. *Scripta Materialia*[J], 2005, 52(9): 851
- [29] Chen Y Y, Li B H, Kong F T. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2007, 17(1): 58
- [30] Kong F T, Cui N, Chen Y Y *et al. Intermetallics*[J], 2014, 55: 66

- [31] Lu Shiqiang(鲁世强), Huang Boyun(黄伯云), He Yuehui(贺跃辉) *Journal of Nanchang Institute of Aeronautical Technology, Natural Science Edition* (南昌航空工业学院学报, 自然科学版)[J], 2001, 15(4): 6
- [32] Zhang C P, Zhang K F. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2010, 492(1-2): 236
- [33] Nieh T G, Hsiung L M, Wadsworth J. *Intermetallics*[J], 1999, 7(2): 163
- [34] Lu Shiqiang(鲁世强), Huang Boyun(黄伯云), He Yuehui(贺跃辉) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 32 (7): 481
- [35] Niu Hongzhi(牛红志), Zhang Yusheng(张于胜), Chen Yuyong(陈玉勇). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(4): 892
- [36] Wang Y, Wang J N, Yang J. *Journal of Alloys and Compounds* [J], 2004, 364(1-2): 93
- [37] Niu H Z, Kong F T, Chen Y Y *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2012, 543: 19
- [38] Zhang Junhong(张俊红), Xu Yajuan(徐亚娟), Huang Boyun(黄伯云) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(6): 1492
- [39] Zhang Junhong(张俊红), Huang Boyun(黄伯云), He Yuehui(贺跃辉) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2003, 13(2): 442
- [40] Sun J, He Y H, Wu J S. *Materials Science and Engineering: A*[J], 2002, 329-331: 885
- [41] Sun J, Wu J S, He Y H. *Journal of Materials Science*[J], 2000, 35(19): 4919
- [42] Clemens H, Kestler H. *Advanced Engineering Materials*[J], 2000, 2(9): 551
- [43] Imayev R M, Salishchev G A, Senkov O N *et al. Materials Science and Engineering: A*[J], 2001, 300(1-2): 263
- [44] Sun Jian(孙 坚), Liu Runkai(刘润开), Wu Jiansheng(吴建生) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2001, 37(1): 95
- [45] Wang Xu(王 旭), Cao Jingxia(曹京霞), Huang Xu(黄 旭). *Journal of Aeronautical*(航空材料学报)[J], 2012, 32(1): 20
- [46] Peng Chaoqun(彭超群), Huang Boyun(黄伯云), He Yuehui(贺跃辉). *Powder Metallurgy Technology*(粉末冶金技术)[J], 2001, 19 (5): 297
- [47] Salishchev G A, Imayev R M, Senkov O N *et al. Materials Science and Engineering: A*[J], 2000, 286(2): 236
- [48] Zhang B, Wang J N, Yang J. *Materials Research Bulletin*[J], 2002, 37(14): 2315

Effects of Alloying Additions on Hot Deformation Processing of TiAl Alloys

Zhang Yu¹, Wang Xiaopeng¹, Kong Fantao¹, Chen Yuyong^{1,2}

(1. National Key Laboratory for Precision Hot Processing of Metals, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(2. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The disadvantages of TiAl alloys such as narrow hot-working window (forging, hot extrusion, rolling, etc), poor high temperature deformability and brittleness at room temperature restrict their applications in actual projects. The research state of effects of alloying additions on hot deformation processing and superplasticity of TiAl based alloys was reviewed. The effects of alloying additions on hot deformation processing of TiAl alloys were discussed from the aspects of the crystal structure of TiAl alloys, the fraction of β phase, microstructures and activation energy. The principles that the alloying method should follow to improve hot deformability of TiAl based alloys and the developing trend of hot deformation processing of TiAl alloys were finally proposed.

Key words: alloying additions; TiAl alloys; hot deformation processing; superplasticity

Corresponding author: Chen Yuyong, Ph. D., Professor, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China, Tel: 0086-451-86418734, E-mail: yychen@hit.edu.cn