

引文格式:杜立华,刘文祎,慕延宏,等.冷却速度对反应合成Ti-Al-Cr-Nb合金微观组织的影响[J].航空制造技术,2026,69(18):26020057.

DU Lihua, LIU Wenyi, MU Yanhong, et al. Effect of cooling rate on microstructure of reaction-synthesized Ti-Al-Cr-Nb alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(18): 26020057.

# 冷却速度对反应合成Ti-Al-Cr-Nb合金微观组织的影响

杜立华,刘文祎,慕延宏,芦博昕,赵冰,王耀奇,李志强

(中国航空制造技术研究院,北京 100024)

[摘要] 采用Ti-Cr-Nb箔材及高纯铝箔通过反应合成法制备了Ti-48Al-2Cr-2Nb合金,对其进行高温热处理并以不同冷却速度冷却,探究冷却速度对反应合成Ti-Al-Cr-Nb合金微观组织的影响机制。结果表明,Ti-4Cr-4Nb箔材和高纯Al箔材通过反应合成法可以制备出Ti-48Al-2Cr-2Nb合金。向钛箔中添加 $\beta$ 稳定元素Cr、Nb,可使 $\beta$ 相以有序 $B_2$ 相稳定保留至室温。其微观组织除等轴 $\gamma$ -TiAl层和 $\gamma$ -TiAl/ $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al片层外,还形成了以 $B_2$ 相为基底的 $B_2$ + $\gamma$ 层组织。通过1300℃高温热处理,可调整各类组织比例,有效降低合金中 $B_2$ 相的含量。相比于等轴 $\gamma$ -TiAl区,冷却速度对反应合成Ti-48Al-2Cr-2Nb合金的 $\gamma$ -TiAl/ $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al片层区和以 $B_2$ + $\gamma$ 区微观组织影响较为显著。反应合成Ti-48Al-2Cr-2Nb合金在冷却阶段依次发生 $\beta \rightarrow \gamma$ 、 $\beta \rightarrow B_2$ 、 $\alpha \rightarrow \alpha + \gamma$ 相变。当冷却速度升高, $\beta \rightarrow \gamma$ 及 $\alpha \rightarrow \alpha + \gamma$ 析出反应会受到不同程度抑制,而 $\beta \rightarrow B_2$ 有序化转变受冷却速度影响较小。

关键词: TiAl合金;反应合成;微观组织;相转变路径;冷却速度

中图分类号: V25;TG156 文献标志码: A DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.26020057



杜立华

高级工程师,研究方向为塑性成形。

随着新一代飞行器飞行速度不断提升,其体表服役温度显著上升,对结构材料的综合性能提出了更为严苛的要求<sup>[1-2]</sup>。TiAl合金密度低、比弹性模量高,在700~800℃工况下可维持400~700 MPa的高温强度,同时具备优异的抗蠕变与阻燃性能,因此被视为21世纪极具发展潜力的高温结构材料之一,在航空领域具有重要的应用价值<sup>[3]</sup>。但TiAl合金本征脆性大,传统成形加工工艺适用性较差<sup>[4-6]</sup>,采用钛、铝箔材为原料,能够在反应合成TiAl合金时同步成形构件,为复杂TiAl构件加工提供了新路径<sup>[7-8]</sup>。

现阶段采用反应合成法制备TiAl合金的研究,多集中于纯钛箔与纯铝箔制备二元TiAl合金,此类合金成分简单,综合性能不具有竞争力<sup>[9]</sup>。当在箔材中加入合金元素,可制备多合金元素TiAl合金。箔材中合金元素的添加对Ti-Al原位反应及冷却过程的相转变路径会产生影响。反应合成TiAl合金的性能受相组成及微观组织影响显著。近些年来,有许多关于TiAl合金相转变行为的研究<sup>[10-13]</sup>。Cheng等<sup>[14]</sup>研究了Ti-44Al-8Nb和Ti-44Al-4Nb-4Zr-0.2Si合金冷却过程中 $\beta$ 相的分解。Niu等<sup>[15]</sup>研究了 $\beta$ - $\gamma$ -TiAl合金的微观

收稿日期: 2026-03-02; 退修日期: 2026-03-31; 录用日期: 2026-05-12

通信作者: 李志强, 研究员, 博士, 研究方向为塑性成形。

组织转变过程,反应合成 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金的冷却过程相转变路径与其他工艺方法制备的 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金或  $\alpha_2+\gamma+\beta$  三相 TiAl 合金均不完全相同。目前,针对反应合成法制备 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金,以及冷却速度对微观组织和相转变的调控规律,相关研究仍处于空白状态。

本文通过反应合成法制备 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金,并对热处理不同冷却方式下材料微观组织及相转变路径开展研究,揭示冷却速度对反应合成 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金微观组织的影响机制。

## 1 试验及方法

本研究使用的原材料为 50  $\mu\text{m}$  厚 Ti-4Cr-4Nb 箔材与 40  $\mu\text{m}$  厚高纯铝箔材( $\text{Al}\geq 99.99\%$ )。箔材经裁剪与酸洗后交替铺叠并通过热等静压制备 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金,热等静压工艺为 600  $^{\circ}\text{C}/80\text{ MPa}/4\text{ h}+1200\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ MPa}/3\text{ h}$ 。通过 Thermo iCAP 7400 光谱仪对反应合成 TiAl 合金成分进行检测。通过电火花线切割从材料中取若干 10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 2 mm 的试样,并放置于箱式电阻炉中开展热处理试验。热处理工艺参数为 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  升温至 1300  $^{\circ}\text{C}$ ,保温时间 1 h,以水冷、空冷和炉冷 3 种不同冷却方式冷却,如图 1 所示。

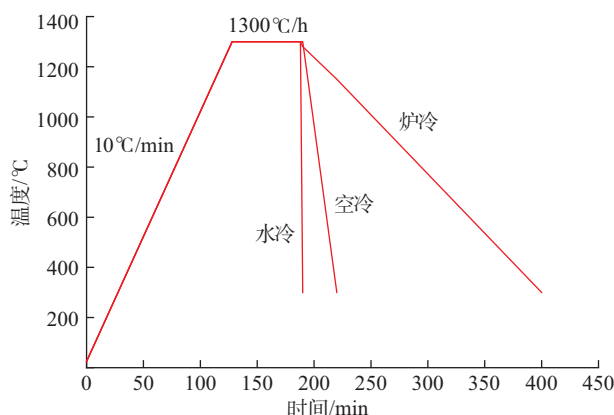


图1 热处理工艺图

Fig.1 Heat treatment schedule

对制备态及热处理态合金用 120#~2000#砂纸打磨,然后用粒度为 2  $\mu\text{m}$  的金刚石研磨膏抛光,采用氢氟酸与硝酸混合溶液进行腐蚀,经酒精清洗吹风机吹干制备金相试样,通过 FIB 制备透射试样。利用光学显微镜、配有 EBSD 的 Zeiss SUPRA55 场发射扫描电子显微镜和透射电镜 (TEM) 进行显微组织及元素、相分布观察。采用 ip66 图像分析软件对显微组织图片进行定量分析。通过人工分析目标组织区域与相邻组织灰度来设定分割值。同一批次相同拍摄参数下的显微组织照片统一使用相同灰度阈值。通过 X 射线衍射仪 (XRD) 对 TiAl 合金进行相组成分析,扫描速度为 2 $^{\circ}/\text{min}$ 。通过差示扫描量热仪 (DSC) 以 20  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  升至 1300  $^{\circ}\text{C}$ ,保温 1 h,再以 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的速率降温,通过采集反应合成 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金高温冷却过程的吸放热情况,推导其相转变顺序及温度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 反应合成 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金微观组织

通过化学分析法对反应合成的 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金进行成分分析,其成分为 Ti-47.7Al-2.1Cr-2.1Nb,与预期的 TiAl4822 (Ti-48Al-2Cr-2Nb) 成分偏差较小。图 2 为反应合

成 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金的微观组织。可以看出, Ti-4Cr-4Nb 箔与 Al 箔经过原位反应后,微观组织由等轴  $\gamma$ -TiAl 层、 $\gamma$ -TiAl/ $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al 片层区和以 B<sub>2</sub> 相为基底的 B<sub>2</sub>+ $\gamma$  层组成。在 Ti-Al 原位反应过程中,随着高温条件下的 Ti、Al 元素扩散,高 Ti 含量区经过  $\alpha\rightarrow\alpha/\gamma\rightarrow\alpha_2/\gamma$  或  $\alpha\rightarrow\alpha_2\rightarrow\alpha_2/\gamma$  转变为片层区,而高 Al 含量区经过  $\text{Al}\rightarrow\text{Al}_3\text{Ti}\rightarrow\text{Al}_2\text{Ti}/\text{Ti}_2\text{Al}_5\rightarrow\gamma\text{-TiAl}$  转变,最终形成  $\alpha_2/\gamma$  片层与等轴  $\gamma$ -TiAl 交替的微观组织。在 Ti-4Cr-4Nb 箔与 Al 箔反应合金中,由于 Cr、Nb 为常见钛合金中  $\beta$  稳定元素,当其以较高含量添加至原材料钛合金箔中,可提升高温  $\beta$  相低温热力学稳定性,使  $\beta$  相以 B<sub>2</sub> 有序相的形式保留至室温,最终形成 B<sub>2</sub>+ $\gamma$  区。

图 3 为反应合成 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金晶粒、相分布与极图。可以看出,片层组织中  $\gamma$  与  $\alpha_2$  片层符合 Blackburn 取向关系  $\{0001\}\alpha//\{111\}\gamma$ ,  $\langle 1120\rangle\alpha//\langle 110\rangle\gamma$ 。B<sub>2</sub> 基底上  $\gamma$  析出存在明显取向性,存在  $\{111\}\gamma//\{110\}\beta$ ,  $\langle 1-10\rangle\gamma//\langle 1-11\rangle\beta$  取向关系。

### 2.2 不同冷却速度热处理下 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金的微观组织

对反应合成 TiAl 合金进行 1300  $^{\circ}\text{C}$  高温热处理,并以不同冷却速度冷却。通常,水冷冷速约为

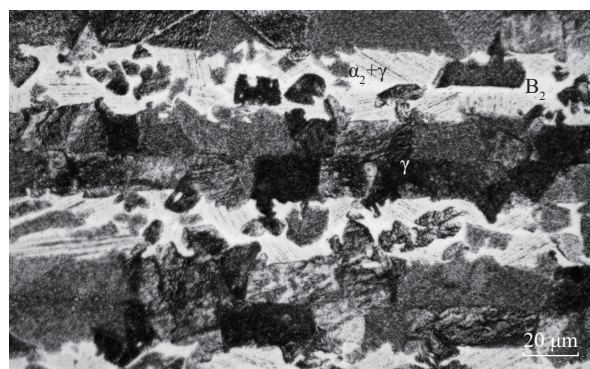


图2 反应合成 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金微观组织

Fig.2 Microstructure of reactively synthesized Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy

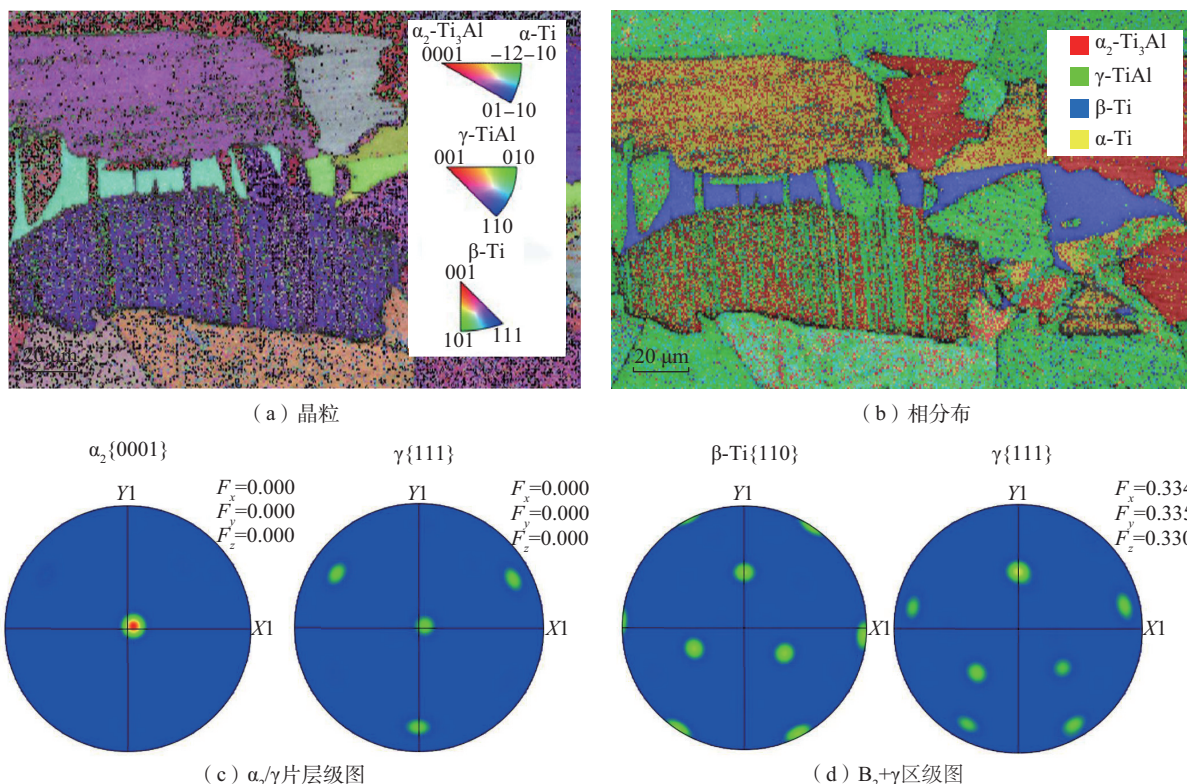


图3 反应合成Ti-48Al-2Cr-2Nb合金晶粒、相分布和极图

Fig.3 Grain, phase distribution and pole figures of reactively synthesized Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy

600~1000 °C/s, 空冷冷速约为 5~50 °C/s, 炉冷冷速约为 0.1~1 °C/s。图4为未热处理及3种冷却方式反应合成Ti-48Al-2Cr-2Nb合金的XRD图谱。可以看出,无论是空冷、水冷还是炉冷,TiAl合金均和热处理前一样,由 $\gamma$ 相、 $\alpha_2$ 相和 $B_2$ 相组成。冷却方式并未影响反应合成Ti-48Al-2Cr-2Nb合金的相组成,但影响了其相比比例。水冷和空冷时,反应合成Ti-48Al-2Cr-2Nb合金中, $\alpha_2$ 峰增强而 $\gamma$ 峰减弱,说明此时合金内部 $\gamma$ 相含量下降而 $\alpha_2$ 相含量增加。这是由于在Ti-Al相图( $\alpha+\gamma$ )两相区较高温下保温,可提升 $\alpha_2/\gamma$ 片层组织相比于等轴 $\gamma$ 的比例。

图5为反应合成Ti-48Al-2Cr-2Nb合金经1300 °C/1 h热处理,再分别以不同方式冷却的微观组织。经热处理后,合金微观组织由等轴 $\gamma$ 区、 $\alpha_2(+\gamma)$ 区和 $B_2(+\gamma)$ 区组成。其中,等轴 $\gamma$ -TiAl区经热处理后晶粒尺寸略有增加,并未发生相转变及其他

组织形态转变。冷却速度对等轴 $\gamma$ -TiAl区微观组织及相组成影响不大。而 $\gamma$ -TiAl/ $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al片层区和 $B_2+\gamma$ 区组织受热处理及热处理冷却速度影响较大。冷却速度是影响TiAl合金微观组织与相组成的关键动力学参数,其通过影响Ti、Al、Cr、Nb原子

的扩散时间、过冷度、 $\gamma$ 相形核率、长大速率等,改变 $\gamma$ 相的析出数量、尺寸与分布。由于水冷冷速较快,过冷度大,原子扩散严重受限,平衡相难以析出, $\gamma$ -TiAl/ $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al共析反应和 $\beta$ 相中析出 $\gamma$ 的反应抑制,仅有极少量 $\gamma$ 相从 $\beta$ 相中析出,如图5(a)和(b)所

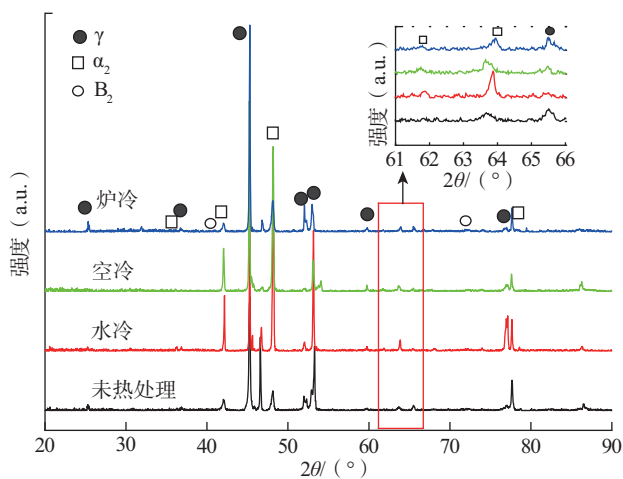


图4 不同方式冷却的反应合成Ti-48Al-2Cr-2Nb合金XRD图谱  
Fig.4 XRD patterns of reactively synthesized Ti-48Al-2Cr-2Nb alloys at different cooling rates

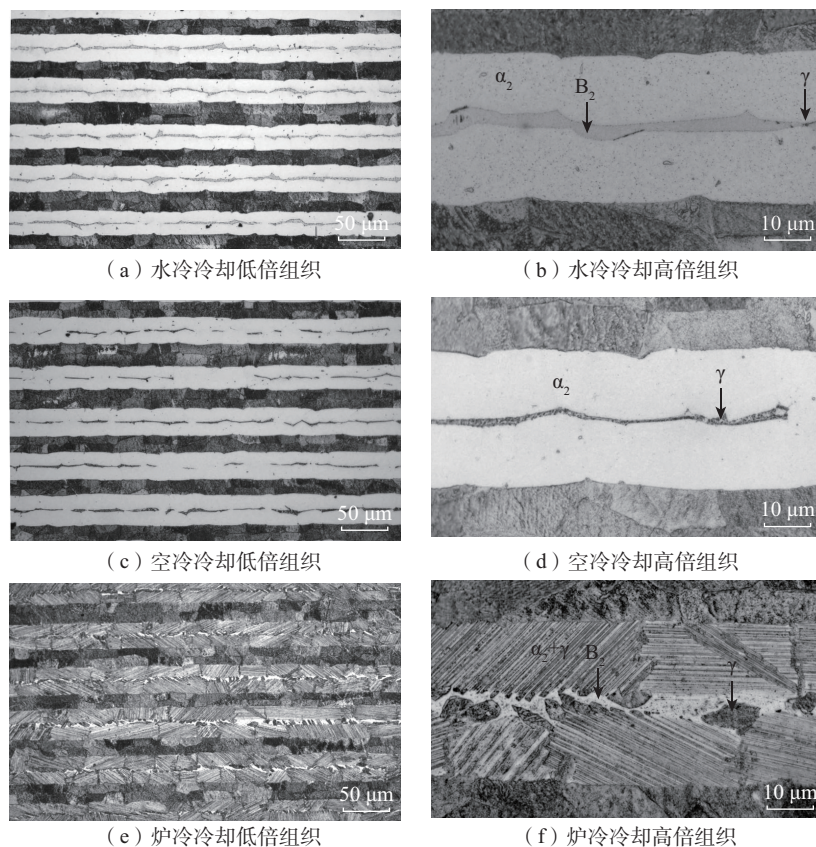


图5 高温保温冷却的反应合成Ti-48Al-2Cr-2Nb合金微观组织  
Fig.5 Microstructure of reactively synthesized Ti-48Al-2Cr-2Nb alloys cooled after high-temperature holding

示。空冷条件下,冷却速度低于水冷,此条件下,扩散受限程度低于水冷,富Ti区 $\gamma$ 相形核率和长大速率适中,可以发生 $\beta \rightarrow \gamma$ 转变,但 $\gamma$ 相的长大与粗化被抑制, $\gamma$ 相尺寸明显下降, $\gamma$ -TiAl/ $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al片层生成的共析反应被抑制,如图5(c)和(d)所示。炉冷条件下冷却速度较慢,高温停留时间长,Ti、Al、Cr、Nb原子扩散最为充分,接近平衡相变。此条件下过冷度小,析出相形核率低,长大较为充分。炉冷条件下能够发生共析反应形成 $\gamma$ -TiAl/ $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al片层, $B_2$ 区中 $\gamma$ 相充分析出并发生粗化长大,其尺寸相比空冷更大。和未热处理的热等静压态TiAl合金微观组织(图2)相比,由于热处理高温保温使 $\beta$ 相减少, $\alpha$ 相增多, $\beta$ 相中析出的 $\gamma$ 相生长受限,因此即使是炉冷冷却,其最终尺寸仍明显小于热等静压态材料中的 $\gamma$ 相尺寸。

由图5(f)可以看出, $B_2$ 相中除了存在与 $B_2$ 相直接形核析出的 $\gamma$ 相外,部分 $\gamma/\alpha_2$ 片层中的 $\gamma$ 相以不连续粗化的方式向 $B_2$ 相内生生长。

图6为高温热处理水冷冷却反应合成Ti-48Al-2Cr-2Nb合金EBSD相分布图。可以看出,高温保温冷却的反应合成Ti-48Al-2Cr-2Nb合金 $B_2$ 基底上 $\gamma$ 相的初始析出位置靠近 $\beta$ 晶界或 $\beta$ 与 $\alpha$ 相的边界处,这是由于靠近 $\alpha$ 相处Al含量较高,Al原子沿

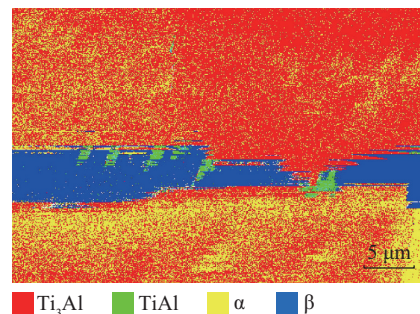


图6 高温保温水冷冷却的Ti-48Al-2Cr-2Nb合金相组成  
Fig.6 Phase composition of reaction-synthesized Ti-48Al-2Cr-2Nb alloys water-cooled after high-temperature holding

晶界扩散较快,因此 $\beta$ 晶界处同样存在高含量Al元素,易发生 $\beta \rightarrow \gamma$ 相转变,其析出存在 $\{111\}\gamma//\{110\}\beta$ , $\langle 1-10 \rangle \gamma//\langle 1-11 \rangle \beta$ 取向关系。表1为不同冷却方式下反应合成Ti-48Al-2Cr-2Nb合金微观组织比例。采用ipp6图像分析软件对微观组织图进行分析,因所有组织区层在图片中长度一致,通过区层在图片中的总宽度之和占图片宽度的比例来作为其面积占比。取不同区域的5张低倍金相,每张金相取3处不同位置做垂直于层间方向的直线,统计直线上不同区域层的宽度占比,最终占比取平均值。可以看出,经热处理后,无论是水冷空冷还是炉冷,相比未热处理材料,等轴 $\gamma$ 区和 $\beta(+\gamma)$ 区占比下降,而 $\alpha_2(+\gamma)$ 区占比升高。3种冷却速度下,各组织区占比相差不大。

## 2.3 讨论

根据Ti-Al相图,在接近 $\alpha$ 相变温度区间保温会降低最终材料中等

表1 不同冷却方式反应合成Ti-48Al-2Cr-2Nb合金微观组织比例

Table 1 Volume fractions of microstructural constituents in reactively synthesized Ti-48Al-2Cr-2Nb alloys with different cooling rates %

| 序号 | 相转变   | 等轴 $\gamma$ 区比例 | $\alpha_2(+\gamma)$ 区比例 | $\beta_2(+\gamma)$ 区比例 |
|----|-------|-----------------|-------------------------|------------------------|
| 1  | 未热处理  | 49.6            | 39.8                    | 10.6                   |
| 2  | 热处理水冷 | 41.5            | 53.2                    | 5.3                    |
| 3  | 热处理空冷 | 39.0            | 58.0                    | 3.0                    |
| 4  | 热处理炉冷 | 38.8            | 55.7                    | 5.5                    |

轴 $\gamma$ 相的体积分数,从而提升 $\alpha_2+\gamma$ 片层体积分数,而1300℃保温温度正处于此温区。在保温过程中,高温为原子扩散提供足够的能量, $\beta$ 区在靠近等轴 $\gamma$ -TiAl区的位置由于Al原子的扩散进入,其Al含量增加,发生 $\beta\rightarrow\alpha$ 转变,随着保温时间的延长, $\beta$ 区占比下降, $\alpha$ 区占比提升,冷却后 $\beta$ 区形成 $B_2$ 或 $B_2+\gamma$ 区, $\alpha$ 区形成 $\alpha_2$ 或 $\alpha_2+\gamma$ 区。图7为高温保温水冷冷却TiAl合金TEM明场相、衍射斑及EDX成分分析。由图7(a)可以看出,经水冷冷却, $B_2$ 相中的 $\gamma$ 析出被显著抑制。由图7(b)~(d)成分分析结果可知, $B_2$ 相的成分为Ti-40.5Al-7.2Cr-4.4Nb,存在Cr、Nb的富集,其相比于 $\alpha_2$ 相具有更高的Ti/Al原子比。因此其 $B_2$ 区微观组织及冷却过程相转变路径相比于 $\gamma+\alpha$ 两相合金Ti-48Al-2Cr-2Nb,会更接近于 $\alpha+\beta+\gamma$ 三相TiAl合金。图8<sup>[16]</sup>合金为高 $\beta$ 稳定元素TiAl合金伪二元相图,可以为合金中 $B_2$ 区低Al高 $\beta$ 稳定元素的情况提供参考,当合金中存在Al含量较低而 $\beta$ 稳定元素含量较高的位置时,局部成分可满足 $B_2$ 相的形成和稳定条件,从而在冷却中,由高温 $\beta$ 相通过有序化转变生成 $B_2$ 相,并一直保持至室温。

图9为高温保温炉冷冷却TiAl合金TEM明场像及EDX成分分析。可以看出,在炉冷冷速下, $\alpha_2$ 区和 $B_2$ 相区中均有 $\gamma$ 相的析出。 $\alpha_2/\gamma$ 片层区的 $\gamma$ 相与 $B_2$ 基底上的片状 $\gamma$ 成分相近。由图9(c)和(d)可知,析出 $\gamma$ 后的 $\alpha_2$ 和 $B_2$ 相中Al含量均显著降低,析出 $\gamma$ 后的 $B_2$ 中Cr进一步富集。

反应成形Ti-Al-Cr-Nb合金在高温冷却过程中,会发生 $\alpha\rightarrow\alpha_2$ 、 $\beta\rightarrow B_2$ 相的两种有序化转变, $\beta/B_2\rightarrow\gamma$ 和 $\alpha/\alpha_2\rightarrow\alpha/\alpha_2+\gamma$ 两种相转变以及 $\gamma$ 相的粗化。由图5不同冷却速度下合金微观组织可知,在水冷、空冷、炉冷3种冷速下分别发生了不同的相转变,

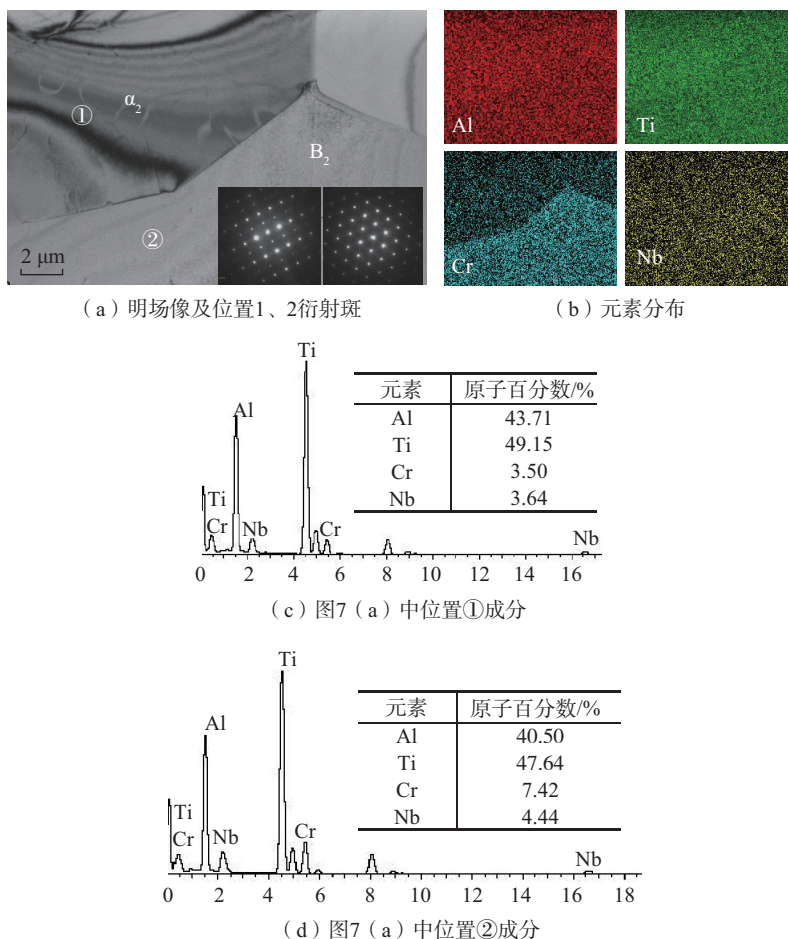


图7 反应合成TiAl合金水冷TEM明场像及EDX成分分析  
Fig.7 Bright-field TEM images and EDX compositional analysis of water-quenched reactively synthesized TiAl alloy

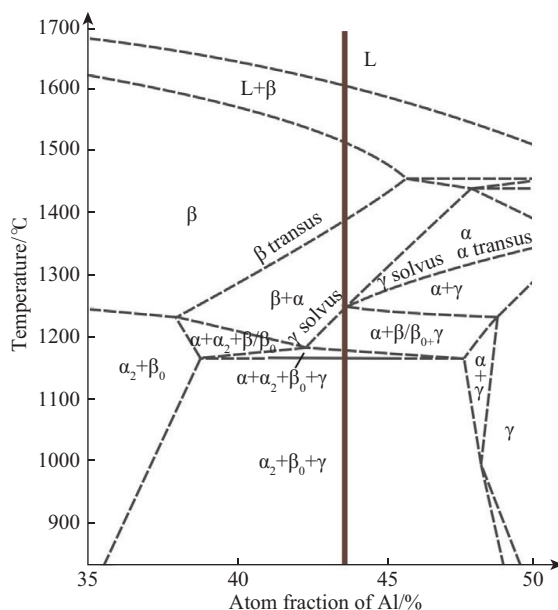


图8 高 $\beta$ 稳定元素TiAl合金(Ti-43.5Al-4Nb-1Mo-0.1B)伪二元相图<sup>[16]</sup>  
Fig.8 Pseudo-binary phase diagram of TiAl alloy with high  $\beta$ -stabilizing elements (Ti-43.5Al-4Nb-1Mo-0.1B) <sup>[16]</sup>

具体如表2所示。

图10为反应合成TiAl合金升温至1300℃保温1h后炉冷的降温段DSC曲线。TiAl合金降温过程中可能发生 $\alpha \rightarrow \alpha_2$ 、 $\beta \rightarrow B_2$ 相的两种有序化转变, $\beta/B_2 \rightarrow \gamma$ 和 $\alpha/\alpha_2 \rightarrow \alpha/\alpha_2 + \gamma$ 两种相转变均为放热过程,而析出相过程的放热峰通常远大于有序化转变的放热峰。对于TiAl合金, $\beta/B_2 \rightarrow \gamma$ 的温度通常会高于 $\alpha/\alpha_2 \rightarrow \alpha/\alpha_2 + \gamma$ 温度<sup>[14]</sup>。 $\beta \rightarrow B_2$ 的有序化转变过程为无序bcc转变为完全长程 $B_2$ 超点阵,原子排列对称性大幅重构,释放潜热多。 $\alpha \rightarrow \alpha_2$ 有序化转变中 $\alpha_2$ 有序为弱局部有序,结构改动小,热焓较低,因此 $\beta \rightarrow B_2$ 的有序化转变放热峰会更为明显。由此可以推测,图10中1270℃附近的放热峰为 $\beta \rightarrow \gamma$ ,1250℃附近的放热峰为 $\beta \rightarrow B_2$ ,1150℃附近放热峰为 $\alpha/\alpha_2 \rightarrow \alpha/\alpha_2 + \gamma$ ,而 $\alpha \rightarrow \alpha_2$ 有序化由于放热较少,在图10中并无明显峰显示。

反应合成TiAl合金高温保温冷却过程相转变路径图如图11所示。当以水冷和空冷冷却时,首先发生 $\beta \rightarrow \gamma$ 析出,随后发生 $\beta \rightarrow B_2$ 有序化转变;冷却至室温后,空冷组织相比于水冷组织, $B_2$ 相区 $\gamma$ 析出更多;当以炉冷冷却时,冷却过程先后发生 $\beta \rightarrow \gamma$ 析出、 $\beta \rightarrow B_2$ 有序化转变,以及 $\alpha/\alpha_2 \rightarrow \alpha/\alpha_2 + \gamma$ 反应及 $B_2$ 基底上 $\gamma$ 的粗化。

### 3 结论

(1)Ti-4Cr-4Nb箔材和高纯箔材通过反应合成法可以制备出Ti-48Al-2Cr-2Nb合金,其微观组织为等轴 $\gamma$ -TiAl层、 $\gamma$ -TiAl/ $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al片层与以 $B_2$ 相为基底的 $B_2 + \gamma$ 层组成的叠层结构。

(2)高温热处理可改变反应合成Ti-48Al-2Cr-2Nb合金微观组织及相比,在1300℃保温1h条件下,材料中 $B_2$ 相含量相较于制备态显著

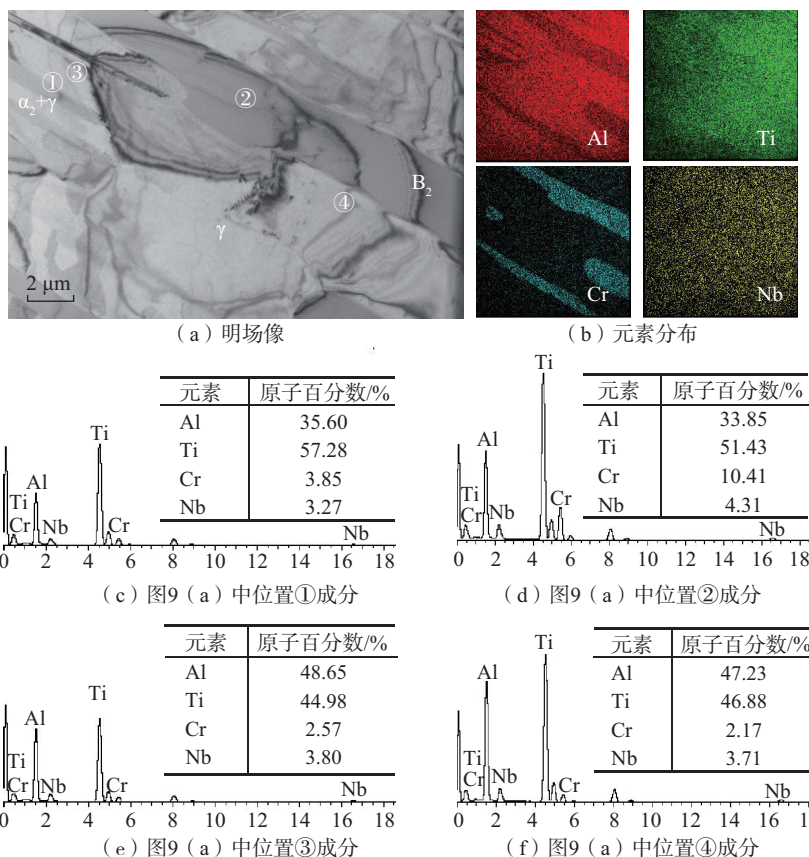


图9 反应合成TiAl合金炉冷TEM明场像及EDX成分分析  
Fig.9 Bright-field TEM images and EDX compositional analysis of furnace-cooled reactively synthesized TiAl alloy

表2 不同冷速下反应合成TiAl合金相转变

Table 2 Phase transformations of reactively synthesized TiAl alloys at different cooling rates

| 相转变                                                    | 水冷  | 空冷 | 炉冷 |
|--------------------------------------------------------|-----|----|----|
| $\alpha \rightarrow \alpha_2$                          | +   | +  | +  |
| $\beta \rightarrow B_2$                                | +   | +  | +  |
| $\beta/B_2 \rightarrow \gamma$                         | +/- | +  | +  |
| $\alpha/\alpha_2 \rightarrow \alpha/\alpha_2 + \gamma$ | -   | -  | +  |
| $\gamma$ 粗化                                            | -   | -  | +  |

注:“+”表示相转变发生;“-”表示相转变未发生;“+/-”表示相转变被显著抑制,但少量发生。

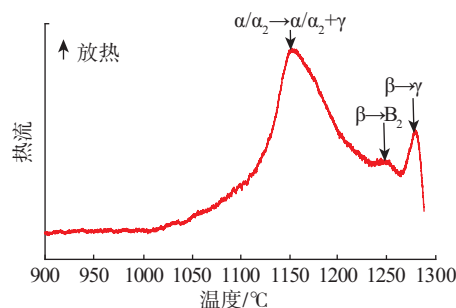


图10 反应合成TiAl合金DSC曲线  
Fig.10 DSC curve of reactively synthesized TiAl alloy

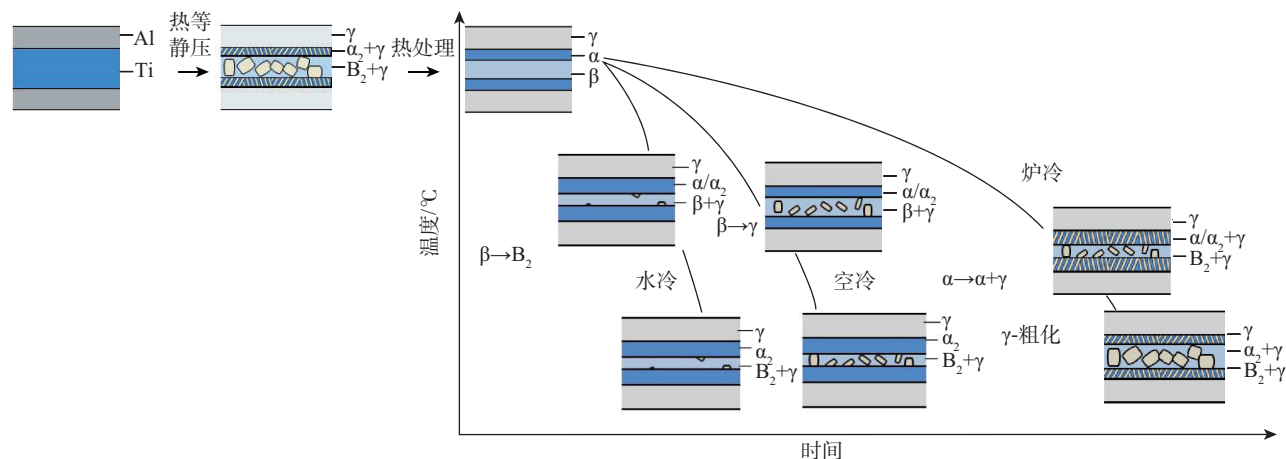


图 11 反应合成 TiAl 合金高温保温冷却过程相转变路径

Fig.11 Phase transformation paths of reactively synthesized TiAl alloy cooled after high-temperature holding

降低。

(3) 热处理冷却方式对反应合成 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金的微观组织有较大影响。水冷组织由  $\gamma$  层、 $\alpha_2$  层和  $B_2$  (+极少量  $\gamma$ ) 层组成, 空冷组织由  $\gamma$  层、 $\alpha_2$  层和  $B_2+\gamma$  层组成, 炉冷组织由  $\gamma$  层、 $\gamma/\alpha_2$  片层区和  $B_2+\gamma$  层组成。

(4) 反应合成 Ti-48Al-2Cr-2Nb 冷却过程先后发生了  $\beta \rightarrow \gamma$ 、 $\beta \rightarrow B_2$ 、 $\alpha/\alpha_2 \rightarrow \alpha/\alpha_2+\gamma$  转变。当冷却速度升高,  $B_2 \rightarrow \gamma$  及  $\alpha \rightarrow \alpha+\gamma$  析出反应会受到不同程度抑制, 而  $\beta \rightarrow B_2$  和  $\alpha \rightarrow \alpha_2$  有序化转变受冷却速度影响较小。

## 参考文献

- [1] 程功, 肖军. 高超音速飞行器热防护材料技术分析[J]. 航空制造技术, 2015, 58(23/24): 43-45, 56.
- [2] 杨丰, 慕延宏, 杜立华. TA32 钛合金应力松弛行为及热成形回弹预测[J]. 航空制造技术, 2025, 68(5): 114-120, 126.
- [3] CLEMENS H, MAYER S. Intermetallic titanium aluminides in aerospace applications—Processing, microstructure and properties[J]. Materials at High Temperatures, 2016, 33(4-5): 560-570.
- [4] CLEMENS H, WALLGRAM W, KREMMER S, et al. Design of novel  $\beta$ -solidifying TiAl alloys with adjustable  $\beta/B_2$ -phase fraction and excellent hot-workability[J]. Advanced Engineering Materials, 2008, 10(8): 707-713.
- [5] CLEMENS H, MAYER S. Design, processing, microstructure, properties, and applications of advanced intermetallic TiAl alloys [J]. Advanced Engineering Materials, 2013, 15(4): 191-215.
- [6] 陈玉勇, 叶园, 张宇, 等. 粉末冶金制备 TiAl 合金研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(11): 4002-4012.
- [7] DU Y, FAN G H, YU T, et al. Effects of interface roughness on the annealing behaviour of laminated Ti-Al composite deformed by hot rolling [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2015, 89: 012021.
- [8] 耿林, 吴昊, 崔喜平, 等. 基于箔材反应退火合成的 TiAl 基复合材料板材研究进展 [J]. 金属学报, 2018, 54(11): 1625-1636.
- [9] LUO J G, ACOFF V L. Processing gamma-based TiAl sheet materials by cyclic cold roll bonding and annealing of elemental titanium and aluminum foils[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 433(1-2): 334-342.
- [10] LI Y, ZHOU L, LIN J P, et al. Phase transformation behavior and kinetics of high Nb-TiAl alloy during continuous cooling[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 668: 22-26.
- [11] ZHANG D, DEHM G, CLEMENS H. Effect of heat-treatments and hot-isostatic pressing on phase transformation and microstructure in a  $\beta/B_2$  containing  $\gamma$ -TiAl based alloy[J]. Scripta Materialia, 2000, 42(11): 1065-1070.
- [12] SCHMOELZER T, LISS K D, ZICKLER G A, et al. Phase fractions, transition and ordering temperatures in TiAl-Nb-Mo alloys: An in-and ex-situ study[J]. Intermetallics, 2010, 18(8): 1544-1552.
- [13] SCHWAIGHOFER E, SCHLOFFER M, SCHMOELZER T, et al. Influence of heat treatments on the microstructure of a multi-phase titanium aluminide alloy[J]. Practical Metallography, 2012, 49 (3): 124-137.
- [14] CHENG T T, LORETTO M H. The decomposition of the beta phase in Ti-44Al-8Nb and Ti-44Al-4Nb-4Zr-0.2Si alloys[J]. Acta Materialia, 1998, 46(13): 4801-4819.
- [15] NIU H Z, CHEN Y Y, XIAO S L, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of a novel beta  $\gamma$ -TiAl alloy[J]. Intermetallics, 2012, 31: 225-231.
- [16] 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: 128-140.

## Effect of Cooling Rate on Microstructure of Reaction-Synthesized Ti–Al–Cr–Nb Alloy

DU Lihua, LIU Wenyi, MU Yanhong, LU Boxin, ZHAO Bing, WANG Yaoqi, LI Zhiqiang  
(AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

**[ABSTRACT]** A Ti–48Al–2Cr–2Nb alloy was fabricated from Ti–4Cr–4Nb foils and high-purity Al foils via reaction synthesis. The alloy was heat-treated at high temperature and then cooled at different rates to reveal the influence mechanism of cooling rates on the microstructure of reaction-synthesized Ti–Al–Cr–Nb alloys. The results show that Ti–48Al–2Cr–2Nb alloy can be successfully prepared via reaction synthesis using Ti–4Cr–4Nb foils and high-purity Al foils. Adding  $\beta$ -stabilizing elements Cr and Nb to Ti foils allows the  $\beta$  phase to be retained as ordered  $B_2$  phase at room temperature. Besides equiaxed  $\gamma$ -TiAl grains and  $\gamma$ -TiAl/ $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al lamellar colonies, the alloy microstructure contains a  $B_2$ + $\gamma$  structure with  $B_2$  phase as the matrix. Heat treatment at 1300 °C can tune the volume fractions of various microstructures and effectively decrease the  $B_2$  phase fraction of the alloy. Compared with equiaxed  $\gamma$ -TiAl zones, cooling rates have a much stronger effect on the microstructures of  $\gamma$ -TiAl/ $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al lamellar colonies and  $B_2$ + $\gamma$  composite zones in reaction-synthesized Ti–48Al–2Cr–2Nb alloy. During cooling of the reaction-synthesized Ti–48Al–2Cr–2Nb alloy, three phase transformations take place in sequence:  $\beta \rightarrow \gamma$ ,  $\beta \rightarrow B_2$ ,  $\alpha \rightarrow \alpha + \gamma$ . With increasing cooling rates, the precipitation reactions  $\beta \rightarrow \gamma$  and  $\alpha \rightarrow \alpha + \gamma$  are suppressed to different extents, while the  $\beta \rightarrow B_2$  ordering transformation shows weak sensitivity to cooling rates.

**Keywords:** TiAl alloy; Reaction synthesis; Microstructure; Phase transition path; Cooling rates

(责编 七七)