

# Ti<sub>2</sub>AlNb 合金工程成形技术

卢正冠, 徐磊, 吴杰, 杨锐

(中国科学院 金属研究所, 沈阳 110016)

**摘要:** Ti<sub>2</sub>AlNb 是一种具有低密度、较好强塑性匹配 (23~650 °C) 和高温疲劳性能优异的航空航天材料, 近 30 年来受到了广泛关注, 尤其是国内研究人员围绕 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金的工程化研究开展了大量工作。受限于 Ti<sub>2</sub>AlNb 金属间化合物的本征脆性和缺口敏感性, 目前仍难找到稳定、高效和经济的 Ti<sub>2</sub>AlNb 复杂构件成形技术。接近工程化应用的成形技术主要包括热变形和粉末热等静压成形, 面向工程应用的成形技术难题在于如何改善 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金的均匀性。

**关键词:** Ti<sub>2</sub>AlNb; 缺口敏感性; 疲劳性能; 粉末冶金

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2022.11.006

**中图分类号:** TG146.2+3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2022)11-0055-09

## Engineering Forming Technology for Ti<sub>2</sub>AlNb Alloy

LU Zheng-guan, XU Lei, WU Jie, YANG Rui

(Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

**ABSTRACT:** Ti<sub>2</sub>AlNb is an aerospace material with low density, good strength-ductility matching (23-650 °C) and high temperature fatigue properties. In the past three decades, it has received extensive attention, especially in China, and a lot of work has been done on the engineering research of Ti<sub>2</sub>AlNb alloys. Due to the intrinsic brittleness and notch sensitivity of Ti<sub>2</sub>AlNb intermetallic compound, it is still difficult to find a stable, efficient and economical forming technology for Ti<sub>2</sub>AlNb complex components. The forming technologies close to engineering applications mainly include thermal deformation and powder hot isostatic pressing. The most critical challenge in Ti<sub>2</sub>AlNb engineering application is the improvement of homogeneity.

**KEY WORDS:** Ti<sub>2</sub>AlNb; notch sensitivity; fatigue properties; powder metallurgy

推重比是衡量先进航空发动机性能的重要参数, 随着钛合金的工程化研究逐步成熟和航空事业的迅速发展, 越来越多的钛合金材料成功应用于发动机, 满足了发动机的减重需求<sup>[1]</sup>。传统钛合金的服役温度一般不超过 550 °C, 为了进一步提高使用温度, Ti-Al 系金属间化合物成为近年来的研究热点, Ti-Al 系合金在 600~900 °C 具有良好的综合性能<sup>[2-3]</sup>。但合金化元素如 Al、Nb 的添加, 给金属间化合物的熔炼和部件成形增加了难度, 元素偏析易造成性能波动或裂纹

萌生。Ti<sub>2</sub>AlNb 合金是 Ti-Al 系合金中的一种, 是向 Ti<sub>3</sub>Al 合金中添加了 Nb 元素, 常见化学成分为 Ti-(22~27) Al-(24~27) Nb, Nb 的大量添加形成了一种新的稳定结构 O 相 (Orthorhombic phase), Nb 元素的添加增加了材料成本<sup>[4-5]</sup>。在 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金中有 α<sub>2</sub>、O 和 B2 等 3 种相。其中, α<sub>2</sub> 相是密排六方结构, 是一种脆性相; B2 相是一种滑移系较多的塑性相, 在高温下会发生 B2-β 相的有序无序转变; O 相由于其结构特点, 介于 α<sub>2</sub> 和 B2 相之间, 具有良好的强度

收稿日期: 2022-09-30

基金项目: 中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划 (YSBR-025)

作者简介: 卢正冠 (1990—), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为粉末冶金成形。

通讯作者: 杨锐 (1965—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为轻质高强合金。

和塑性匹配。

$\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金具有良好的高温 (650~750 °C) 力学性能, 密度较低, 有望替代高温合金实现部分结构件的减重。因此, 瞄准实际应用、解决成形工程难题一直是研究  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的重点。以  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  为名义原子占比的 O 相被发现和标定后<sup>[6]</sup>, 国内外学者开展了关于 O 相的形成机理研究, O 相可以通过 B2 ( $\beta$ ) 或  $\alpha_2$  以多种相变方式形成<sup>[7-8]</sup>, 目前已基本掌握了相变的温度范围。近 30 年来, 针对  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的 Al、Nb 主元素和 V、Mo、Fe 等微量元素开展了研究工作, 基本制订了面向工程应用的成分范围<sup>[9]</sup>。此外, 研究所和高校开展了  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金典型组织与力学性能影响关系研究,  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的典型组织主要包括等轴、片层和多态组织等<sup>[10]</sup>。

掌握  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的相变规律, 为开展合金的工程成形技术研究奠定了良好基础, 但由于  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  铸锭制备过程易产生成分偏析、疏松等缺陷<sup>[11]</sup>, 高品质  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  铸锭的制备难度大、材料利用率低, 铸锭的微小缺陷会增加后续变形、机械加工和制粉难度, 提高材料成本。因此, 接近工程化应用的  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  成形技术必须考虑三相合金在加工过程中的复杂相变对性能的影响, 应利用理论预测和试验分析等手段指导实际生产, 以提高  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金零件的成功率, 避免铸锭缺陷引起的开裂失效。

如图 1 所示,  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  的相转变区间约为  $t_{\text{B2}} > 1060\text{ °C} > t_{\text{B2}+\alpha_2} > 990\text{ °C} > t_{\text{B2}+\alpha_2+\text{O}} > 830\text{ °C} > t_{\text{B2}+\text{O}}$ 。 $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  变形合金 (Wrought alloy) 主要采用近  $\beta$  锻造工艺制备, 热变形温度一般不低于 1000 °C, 考虑温降和  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  的变形抗力, 单道次变形量不宜过大, 变形合金的热加工 (Deforming) 火次多;  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  粉末冶金热等静压合金 (Powder metallurgy hot isostatic pressing, PM-HIP alloy) 是以  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  预合金粉末为原材料, 粉末经过 2 次液固相变, 通过热等静压致密化, 热等静压温度一般在  $\alpha_2 + \text{B2}$  两相区。该 2 种  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  成形技术已获得工程化应用, 共同点是通过热、力作用调整组织, 避免单相区保温造成晶粒长大。3D 打印技术的热源与焊接技术相似,  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金需再经历一次熔炼 (Melting) 后成形, 液固相变易造成热影响区的元素偏析, 降低材料塑性。因此,  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的增材制造和焊接难度较大。

## 1 $\text{Ti}_2\text{AlNb}$ 合金热变形工艺

由于  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的室温变形抗力大, 冷变形几乎无法实现, 采用高温热变形是愈合铸锭孔隙的重要手段, 常采用高于 1060 °C 的单相区保温温度进行  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的开坯或初轧。此外, 热等静压是以惰性气体作为介质向构件施加近似各向同性的压力<sup>[12]</sup>, 通过高温高压环境也可以起到愈合铸锭缺陷的效果。

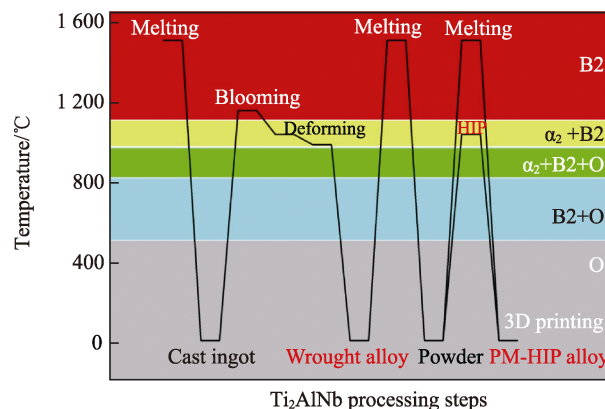


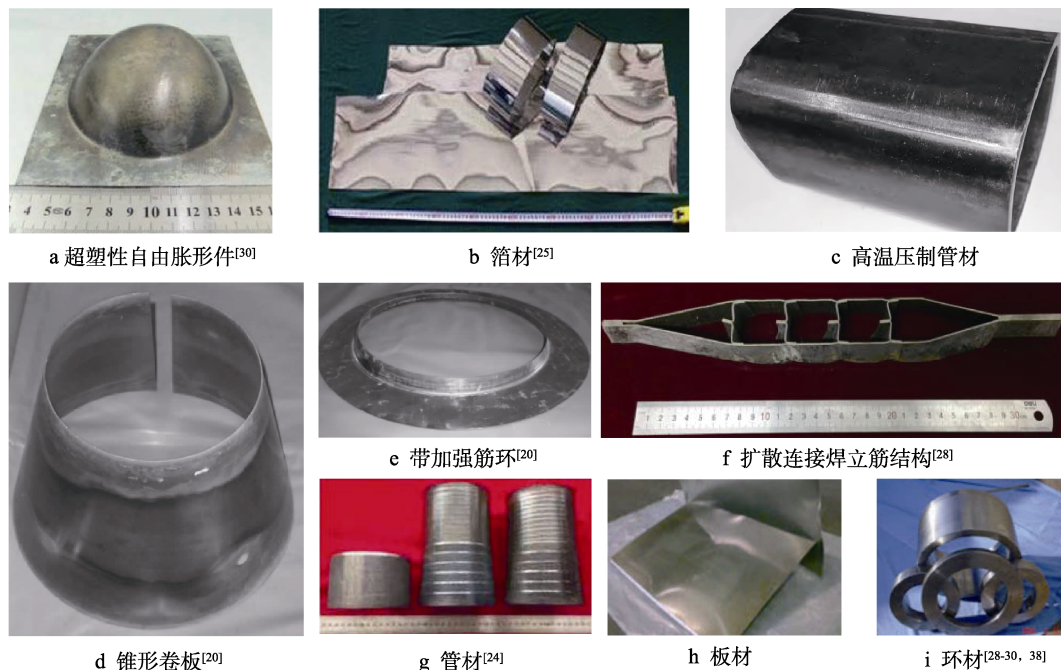
图 1  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的制备流程

Fig.1 Preparation process of  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  alloy

改善铸锭变形性能是  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  板材、棒材或环件成形前的必要步骤。

$\text{Ti}_2\text{AlNb}$  铸锭经开坯或热等静压愈合缺陷后, 可以开展后续热变形。设备能力也是  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  热变形加工的一个难题,  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金密度低、变形抗力大, 即便是制备尺寸较小的  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  锻件, 仍然需要使用较大吨位的设备, 且变形过程的温降极易引起合金开裂<sup>[13]</sup>。现有的钛合金或高温合金加工设备难以直接满足  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的变形工艺要求, 锻件与设备工装等尺寸的不匹配增加了热变形难度。

为了找到适合于  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  工程应用的热变形制度, 常见方法是采用等温压缩试验和 Prasad<sup>[14-15]</sup>提出的动态材料模型 (Dynamic materials model, DMM) 研究热变形特点, 揭示合金的变形机理, 并尝试建立合理的热加工窗口。图 2 给出了采用热变形工艺制备的  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  产品, 该产品是钢铁研究总院采用锻造和轧制工艺制备的, 采用热模拟压缩试验的方法初步制定了  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的热变形参数<sup>[16-18]</sup>,  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  铸锭在 B2 相单相区开坯锻造, 然后在  $\alpha_2 + \text{B2}$  两相区变形, 制备出的  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  变形合金具有良好的高温性能, 成型的板材、环件、钣金件等部分进入工程应用阶段。西南交通大学<sup>[19]</sup>开发了一种“热处理+热机械加工”工艺, 即先通过热处理获得细小均匀的 O+B2 显微组织, 再进行热机械加工。实验表明, 在这种工艺下可以得到等轴的  $\alpha_2/\text{O}$  相及细 O 相板条的双态组织。北京航星机器制造公司<sup>[20]</sup>以  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金冷轧薄板为研究对象, 进行了冷、热成形与热处理实验研究, 在不低于 850 °C 条件下, 实现了带翻边焊接筒件的热成形, 在 900 °C、2 h、空冷 (Air cooling, AC) 的条件下, 实现了  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的筒件热校形 (见图 2d—e)。上海同济大学<sup>[21-23]</sup>采用等温锻造工艺制备  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金,  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  铸锭经过热处理后优化成分分布和消除缺陷, 通过包套开坯锻造可以显著改善合金的组织 and 变形性能, 后续的锻造变形温度可以适当下潜防止晶粒长大, 并成功试制出  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  板材。哈尔滨工业大学<sup>[24]</sup>设计并实施了采用焊接 Ti-22Al-

图 2 热变形工艺制备的  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  产品Fig.2  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  products produced by thermal deformation process

24Nb-0.5Mo 合金厚管坯件的多道热力旋压工艺, 成功形成无裂纹的  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金薄壁管状零件 (见图 2g)。中科院金属所<sup>[25-26]</sup>较早地发展了  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的热机械变形工艺, 已经成功试制出厚度仅为 1.5 mm 的  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  箔材及锻件产品 (见图 2b)。

由于  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的变形抗力大、热响应敏感, 部分研究工作也围绕  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的超塑性成形展开<sup>[27]</sup>, 通过有限元法进行模拟, 分析变形过程中的应力分布、尺寸变化等。在 960~980 °C 温度附近、 $10^{-4}\sim 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  应变速率范围,  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金板材的伸长率可以超过 100%。哈尔滨工业大学<sup>[28]</sup>采用有限元方法模拟了  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金材料的超塑性成形过程, 通过超塑性成形和扩散连接组合工艺方式, 成形了外观质量良好的中空 4 层结构的 Ti-22Al-27Nb 合金零件 (见图 2f), 利用神经网络模型进行了  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的组织与性能预测<sup>[29]</sup>, 并通过有限元方法根据高温统一黏塑性本构模型探究了材料的热变形全过程。合肥工业大学<sup>[30]</sup>使用 MSC.MARC 软件, 利用幂律模型分析了 950 °C 下  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  板材的超塑性自由胀形过程 (见图 2a)。超塑性成形是一种等温变形, 对合金的保温措施和设备加工能力提出了很高要求,  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  等温变形的成本较高。

$\text{Ti}_2\text{AlNb}$  铸锭在开坯变形后, 常在 B2+ $\alpha_2$  保温后进行精锻、轧制等, 但 B2 相在低于单相区温度区间内的热变形过程中再结晶困难, 在  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金中容易形成织构或厚的  $\alpha_2$  相晶界, 从而降低了材料的可加工性, 这造成  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  在工程变形过程中的单道次变形量较低, 热变形后需进行修磨。目前, 基本掌握了  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的热变形制度, 为了更好地开展工程

成形工作, 需要进一步改进加工过程的保温措施, 提升每火次的变形量, 控制  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金热加工过程的组织, 避免因热力影响降低材料性能, 造成变形开裂。

## 2 $\text{Ti}_2\text{AlNb}$ 合金粉末冶金成形

$\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金粉末冶金成形技术是以金属粉末为原材料, 由于钛的高反应活性, 粉末必须具有很高的洁净度<sup>[31]</sup>。 $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  粉末的制备过程与一般钛合金近似, 粉末需要经历一次液固相变, 可能造成杂质元素增加, 尤其是氧含量的变化, 因此, 需要选择洁净的制粉工艺开展  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金粉末的制备<sup>[32]</sup>。目前, 国际上比较流行的制粉工艺是等离子旋转电极法 (Plasma rotating electrode process, PREP) 和无坩埚感应熔炼超声气体雾化法 (Electrode induction melting gas atomization, EIGA)<sup>[33]</sup>。这 2 种方法均属于预合金粉末 (Pre-alloyed powder) 制备方法, 制粉过程洁净, 可以有效地降低合金元素损耗。以表面光洁、成分均匀的  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  喷粉电极为原材料, 可以制备出球形度好、粒度分布均匀的  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  粉末。

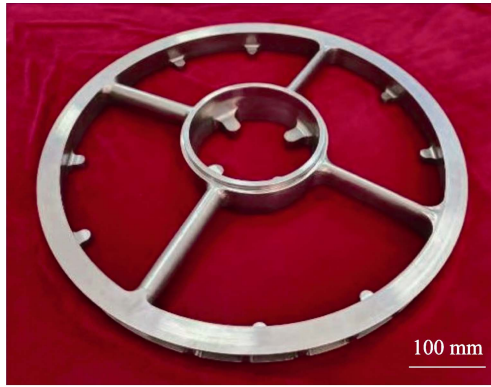
粉末冶金成形技术的优势是具有较高的粉末材料利用率, 能实现复杂结构的一体成形, 以解决复杂尺寸难加工的问题, 或通过减少机加量提高零件的批产效率。 $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的粉末冶金成形技术主要包括热等静压和增材制造。粉末热等静压 (PM-HIP) 技术或称粉末近净成形 (Powder metallurgy near net shaping, PM-NNS) 技术, 是利用模具 (包套) 作为媒介, 将粉末填充在模具内, 粉末和模具在热等静压炉中协同收缩变形, 粉末致密化的过程不产生液相<sup>[34]</sup>。



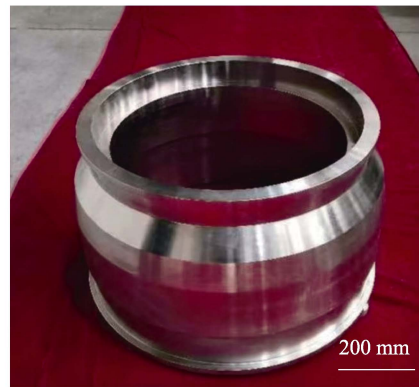
粉末热等静压技术与精密铸造技术的模具设计原理近似，由于粉末的粒径较小，PM-HIP 技术能够制备出成分均匀的  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金，消除了变形合金的宏观成分偏析和性能散差大等问题<sup>[35]</sup>。

粉末热等静压技术适合于制备具有内部型腔、气体通道和机加工量大的发动机复杂零件，零件的成形

尺寸和热等静压成本受限于热等静压炉的尺寸和装炉方式<sup>[36]</sup>。图 3 给出了采用该工艺制备出的  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金复杂构件，成功制备出直径超过 900 mm 的  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  环坯，部分零件已在航天领域获得了应用。该技术的最大难点是粉末的收缩变形大，包套易在高温高压下发生泄漏，精确尺寸控制难度大。



a  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  支板



b  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  机匣毛坯

图 3  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  粉末热等静压成形零件

Fig.3 Powder hot isostatic pressing forming parts of  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  powder

$\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的增材制造技术发展时间最短，一般选择 0~53  $\mu\text{m}$  的细粉，利用电子束融化、激光选区打印和等离子放电烧结等制造技术。彼得斯堡理工大学<sup>[37]</sup>以 Ti、Al、Nb 粉末作为 Ti-22Al-25Nb 的初始粉末，使用 SLM 280HL 机器进行激光选区熔化，然后在 1 050  $^{\circ}\text{C}$ 、100 MPa、3 h 的制度下进行热等静压，在 1 350  $^{\circ}\text{C}$ 、2 h、炉冷的制度下热处理，制备完全致密的  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  基合金。目前， $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  的增材制造技术仍需要开展大量的工艺探索，还缺乏足够的性能测

试结果。

不同样品状态  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的拉伸性能见表 1，变形合金与粉末冶金合金在室温下的拉伸性能没有明显区别，变形合金 650  $^{\circ}\text{C}$  的拉伸强度高于粉末合金。随着锻造工艺和粉末冶金制备工艺的变化，不同状态的拉伸性能存在明显差异，进一步说明了  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的性能受热力响应敏感。在进行力学性能统计时发现，同一状态的  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金样品存在性能波动，热处理能够有效地调整强度和塑性匹配。

表 1  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的典型拉伸性能

Tab.1 Typical tensile properties of  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  alloy

| 样品名称                                                     | 室温           |              |           |             | 650 $^{\circ}\text{C}$ |              |           |             |
|----------------------------------------------------------|--------------|--------------|-----------|-------------|------------------------|--------------|-----------|-------------|
|                                                          | 抗拉强度/<br>MPa | 屈服强度/<br>MPa | 伸长率/<br>% | 断面<br>收缩率/% | 抗拉强度/<br>MPa           | 屈服强度/<br>MPa | 伸长率/<br>% | 断面收缩率/<br>% |
| Ti-22Al-27Nb 盘件                                          | 1 101        | 1 000        | 6.5       | 7           | 851                    | 696          | 10.0      | 58          |
| Ti-22Al-25Nb 棒材                                          | 1 160        | 1 070        | 12.5      | 16          | 945                    | 845          | 7.0       | 27          |
| Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo<br>粉末冶金                             | 1 065        | 902          | 7.0       | 11          | 720                    | 595          | 15.5      | 13          |
| Ti-22Al-25Nb 锻件 <sup>[38]</sup>                          | 1 140        | 1 050        | 10.5      | 14          | 880                    | 785          | 20.0      | 65          |
| Ti-22Al-25Nb 烧结 <sup>[39]</sup>                          | 1 105        | /            | 9.4       | /           | 797                    | /            | 12.8      | /           |
| Ti-24Al-25Nb-1Zr-1.4V-<br>0.6Mo-0.3Si 烧结 <sup>[40]</sup> | 1 027        | /            | 1.1       | /           | 860                    | /            | 5.8       | /           |
| Ti-23Al-17Nb 粉末冶金 <sup>[41]</sup>                        | 1 095        | 910          | 13.0      | /           | 815                    | 645          | 32.0      | /           |

### 3 $\text{Ti}_2\text{AlNb}$ 合金粉末制坯和环轧

$\text{Ti}_2\text{AlNb}$  成形零件的尺寸越大、形状越复杂，材料本身难变形、难加工的特点越突出。以先进航空发动机用  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  燃烧室机匣 ( $d \geq 800$  mm) 为例，传

统的热变形技术存在锻造火次多、失效风险大的难点，粉末近净成形技术的精确尺寸控制难度大。基于这一背景，中科院金属所<sup>[42]</sup>提出了一种粉末冶金制坯和环轧变形的新工艺制备  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  机匣，开展了大量理论分析和试验验证工作。粉末冶金  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金

具有与变形合金相似的变形特点, 变形抗力、热激活能等参数接近, 粉末合金可以承受更低的温度和更高的应变速率条件而不开裂。采用合理的保温措施和改进环轧参数, 能够实现  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  燃烧室机匣异形截面毛坯的轧制成形, 轧制可以改善粉末坯料的力学性能。

针对机匣的应用背景, 开展了  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  疲劳极限的研究工作。疲劳性能是考查  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金零件长时应用的重要力学性能。从燃烧室机匣毛坯的本体取样, 采用 QBWP-10000 型旋转弯曲疲劳试验机进行试验,  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  疲劳样品的尺寸和检测方法参考 GB/T 4337—1984 进行, 样品表面是机械加工态。采用正弦波加载, 试验加载频率 83.3 Hz, 测试采用悬臂梁方式, 通过升降法测试了  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  异形环在热处理前后

的疲劳极限。固溶热处理为 980 °C、2 h、AC, 时效热处理为 830 °C、24 h、AC, 环轧样品的疲劳极限为 520 MPa, 热处理态样品的疲劳极限为 500 MPa。

几种疲劳测试条件下的断口如图 4 所示, 通过断口形貌和疲劳测试结果的比对, 可以更好地分析  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金疲劳结果的特点。在图 4a—b 中, 测试条件的应力超过疲劳极限较多, 疲劳断口处没有观察到明显的裂纹源, 而是在沿着试样边缘处存在明显的解理平面; 如图 4c—d 所示, 是在疲劳强度的测试条件下疲劳寿命出现较大波动的样品断口, 裂纹源均在样品表面, 断口的裂纹形状呈扇形, 说明裂纹是从  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  疲劳样品的表面萌生逐步扩展到内部, 这与  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的缺口敏感性有重要关系。

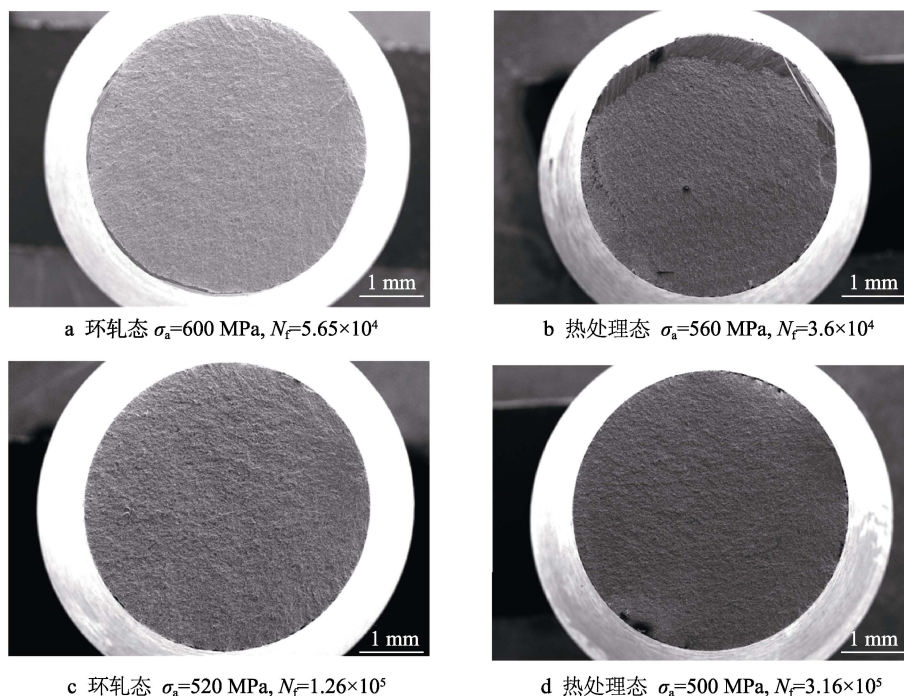


图 4  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  异形环件室温疲劳断口

Fig.4 Room temperature fatigue fracture of  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  special shaped ring

如图 5 所示, 给出了 2 种典型测试条件下的断口。图 5a—b 是强度测试条件超过疲劳极限 40 MPa 的断裂形貌, 裂纹源在接近合金表面的基体上, 放大后观察没有孔隙或原始颗粒存在, 说明断裂机理不是缺陷控制, 断口形貌是一种典型的塑性形貌, 存在大量的韧窝网状结构; 图 5c—d 是热处理态样品在疲劳极限强度以下的断裂形貌, 裂纹源在靠近表面的基体上, 放大后观察也是一种典型的网状形貌。  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的旋转弯曲疲劳极限主要与材料的强度成正比,  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  的缺口敏感是降低疲劳寿命的主要原因。

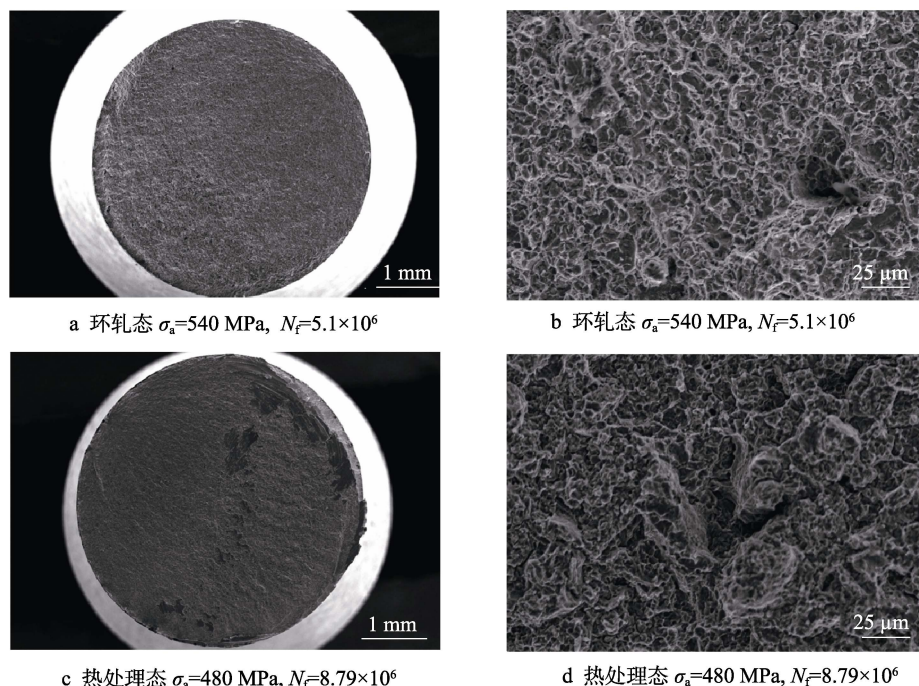
#### 4 $\text{Ti}_2\text{AlNb}$ 合金的焊接

焊接作为一种关键构件的制造和连接方法, 在保

证结构整体化的同时能减轻构件质量。通过开展  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的焊接工艺和焊料等研究, 能够推进  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  的工程应用<sup>[43]</sup>。基于  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金高强度低韧性的特点, 目前多家单位尝试不同的焊接方法, 包括电子束焊接 (Electron Beam Welding, EBW)、激光束焊接 (Laser Beam Welding, LBW)、钎焊 (Brazing, BW) 和扩散焊接 (Diffusion Welding, DW) 等。

EBW 焊接适合连接钛合金, 是由于它具有干净的真空室和高能量密度, 热影响区小、残余应力低。EBW 焊接后的焊缝位置铌含量高, 熔合区基本由不稳定的 B2 相组成。因此, 为了优化微观结构, 需要进行焊后热处理来提高焊缝机械性能。清华大学<sup>[44]</sup>利用电子束焊接方法对圆形接头进行热处理, 研究了



图5  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  异形环件的 650 °C 疲劳断口Fig.5 Fatigue fracture of  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  special shaped ring at 650 °C

$\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金热裂纹的特点和形成机理, 还通过有限元方法估算电子束焊接  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的残余应力。中科院金属所<sup>[45]</sup>采用电子束焊接了粉末  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的环坯和板坯, 热影响区较窄, 平均宽度约为 1 mm, 焊后热处理可以减少孔隙缺陷, 焊态接头的强度保持率超过 90%, 但残余的焊接孔隙会恶化材料性能。激光焊接也是高能量密度的焊接方式, 通常以粉末或焊丝作为焊接耗材。东北大学<sup>[46]</sup>以 Ti、Al、Nb 和 NbC 粉末为原料, 利用激光填粉焊接方法, 在 Ti-6Al-4V 合金板上制备了 TiC 增强  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  基涂层。

钎焊可用于不同尺寸和形状的接头, 操作方便, 但钎料需要根据焊接对象材质进行选择。西北工业大学<sup>[47]</sup>将 Ti6Al4V 和  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金, 分别用 TiZrCuNi、TiZrCuNi 与 Ti 或 Zr 粉混合填充进行钎焊, 研究了 Ti-Zr-Cu-Ni 钎焊接头的显微组织演变、反应相的生成和生长机制及力学性能。天津大学<sup>[48]</sup>填充惰性金属 Ag-Cu-Zn 使得 C/C 复合材料与  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金连接为钎焊接头, Ti、Al、Nb 等元素从基体向焊缝的溶解扩散, 影响焊接接头的微观结构和力学性能。

$\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金在焊接后的性能衰退与液固相变后的元素偏析有关, 因此采用扩散焊接可能是一个良好的解决途径, 扩散焊可以在相对较低的温度下实现金属的连接。北京航空材料研究所<sup>[49]</sup>利用 Cu/Ti 复合中间层将  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金与 GH536 合金进行了扩散连接。西北工业大学<sup>[50]</sup>使用真空扩散键合机, 将高铌 TiAl 合金和  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金在 930~1 000 °C、60~120 min、15~25 MPa 的条件下进行连接, 并在 1 000 °C 下对连接接头进行焊后热处理。 $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金在焊接后, 极

易在焊缝位置形成焊接孔隙, 接头的强度需要进一步开展焊接参数优化的研究工作。

## 5 结语

$\text{Ti}_2\text{AlNb}$  是一种具有 O、B2 和  $\alpha_2$  等 3 相的金属陶瓷, 面向工程应用的成形技术难题在于如何改善  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的均匀性, 避免  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  构件在制备和加工中因材料的缺口敏感性而失效。提高  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  大尺寸铸锭的熔炼技术, 改善热机械变形工艺和工装设计, 掌握适合于  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  粉末热等静压技术的组织演化规律, 结合仿真计算提高  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  零件的研制成功率, 解决  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的焊接难题, 是未来  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  工程成形技术的研究热点。

## 参考文献:

- [1] BOYER R R. An Overview on the Use of Titanium in the Aerospace Industry[J]. Materials Science and Engineering: A, 1996, 213(1/2): 103-114.
- [2] BEWLAY B P, WEIMER M, KELLY T, et al. the Science, Technology, and Implementation of TiAl Alloys in Commercial Aircraft Engines[J]. MRS Online Proceedings Library Archive, 2013, 12: 1516.
- [3] YANG R. Fundamental and Application-Oriented Research on Gamma Alloys [M]. Gamma Titanium Aluminum Alloys, 2014, 2014: 121-34.
- [4] 王斌, 张凯锋, 蒋少松, 等. 固溶温度对  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  基金组织演变的影响[J]. 航空材料学报, 2015, 35(3):

- 7-12.  
WANG Bin, ZHANG Kai-feng, JIANG Shao-song, et al. Effect of Solution Treatment Temperature on Microstructural Evolution of Ti<sub>2</sub>AlNb-based Alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2015, 35(3): 7-12.
- [5] 王殿梁, 丁桦, 白秉哲. 锻态 Ti<sub>3</sub>Al 基合金超塑压缩的力学行为及组织演变[J]. 稀有金属材料与工程, 2001 (6): 444-447.  
WANG Dian-liang, DING Ye, BAI Bing-zhe. Mechanical Behavior and Microstructure Evolution of Superplastic Compression of Forged Ti<sub>3</sub>Al-base Alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2001, (6): 444-447.
- [6] BANERJEE D, WILLIAMS J C. Perspectives on Titanium Science and Technology[J]. Acta Materialia, 2013, 61(3): 844-879.
- [7] BANERJEE D. The Intermetallic Ti<sub>2</sub>AlNb[J]. Progress in Materials Science, 1997, 42(1): 135-158.
- [8] DU Z, ZHANG K. The Superplastic Forming/Diffusion Bonding and Mechanical Property of TA15 Alloy For Four-Layer Hollow Structure with Squad Grid[J]. International Journal of Material Forming: Official Journal of the European Scientific Association For Material Forming - Esaform, 2021, 14(5): 1057-1066.
- [9] 陈卓. Ti<sub>2</sub>AlNb 基合金多向等温锻造组织与力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 46-65.  
CHEN Zhuo. Research on Microstructure and Mechanical Properties of Ti<sub>2</sub>AlNb-Based Alloy Fabricated by Multiple Isothermal Forging[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 46-65.
- [10] 程军, 毛勇. Ti<sub>2</sub>AlNb 合金金相试样的制备方法[J]. 钛工业进展, 2013, 30(2): 32-34.  
CHENG Jun, MAO Yong. The Preparation Method of Metallographic Sample for Ti<sub>2</sub>AlNb Alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2013, 30(2): 32-34.
- [11] ZHOU Y G, ZENG W D, YU H Q. An Investigation of a New Near-Beta Forging Process for Titanium Alloys and Its Application in Aviation Components[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 393(1/2): 204-212.
- [12] 黄东, 魏战雷, 朱郎平, 等. 热等静压对 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(8): 835-837.  
HUANG Dong, WEI Zhan-lei, ZHU Lang-ping, et al. Influence of HIP Process on Mechanical Properties of Ti<sub>2</sub>AlNb Alloy Castings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2018, 38(8): 835-837.
- [13] 冯艾寒, 李渤渤, 沈军. Ti<sub>2</sub>AlNb 基合金的研究进展[J]. 材料与冶金学报, 2011, 10(1): 30-38.  
FENG Ai-han, LI Bo-bo, SHEN Jun. Recent Advances on Ti<sub>2</sub>AlNb-based Alloys[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2011, 10(1): 30-38.
- [14] PRASAD Y V R K, SESHACHARYULU T. Processing Maps for Hot Working of Titanium Alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 1998, 243(1/2): 82-88.
- [15] SRINIVASA N, PRASAD Y V R K. Hot Working Characteristics of Powder Metallurgy Nimonic AP-1 Superalloy[J]. Powder Metallurgy, 2013, 44(3): 267-273.
- [16] WEI W, WEIDONG Z, CHEN X, et al. Designed Bimodal Size Lamellar O Microstructures In Ti<sub>2</sub>AlNb Based Alloy: Microstructural Evolution, Tensile and Creep Properties[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 618: 288-294.
- [17] WEI WANG, WEIDONG ZENG, YALING SUN, et al. Microstructure, Tensile, and Creep Behaviors of Ti-22Al-25Nb (at.%) Orthorhombic Alloy with Equiaxed Microstructure[J]. Materials Science & Engineering, A. Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing, 2018, 11(7): 1244.
- [18] LIN P, HE Z, YUAN S, et al. Instability of the O-Phase In Ti-22Al-25Nb Alloy During Elevated-Temperature Deformation[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2013, 578: 96-102.
- [19] PENG J, MAO Y, LI S, et al. Microstructure Controlling by Heat Treatment and Complex Processing For Ti<sub>2</sub>AlNb Based Alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2001, 299(1/2): 75-80.
- [20] 史科, 刘洋, 武增臣, 等. Ti<sub>2</sub>AlNb 基合金薄壁构件热成形工艺研究[J]. 材料科学与工艺, 2013, 21(5): 40-44.  
SHI Ke, LIU Yang, WU Zeng-chen, et al. Research on Hot Forming Process of Ti<sub>2</sub>AlNb Alloy Thin-walled Component[J]. Materials Science and Technology, 2013, 21(5): 40-44.
- [21] 冯艾寒, 李渤渤, 沈军. Ti<sub>2</sub>AlNb 基合金的研究进展[J]. 材料与冶金学报, 2011, 10(1): 30-38.  
FENG Ai-han, LI Bo-bo, SHEN Jun. Recent Advances on Ti<sub>2</sub>AlNb-based alloys[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2011, 10(1): 30-38.
- [22] LIN P, HE Z, YUAN S, et al. Tensile Deformation Behavior of Ti-22Al-25Nb Alloy at Elevated Temperatures[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 556(30): 617-624.
- [23] 杨锐, 郝玉琳, OBBARD E G, 等. 钛合金中的正交相变及其应用[J]. 金属学报, 2010, 46(11): 1443-1449.  
YANG Rui, HAO Yu-lin, OBBARD E G, et al. Orthorhombic Phase Transformations in Titanium Alloys and Their Applications[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(11): 1443-1449.
- [24] SIBING W, WENCHEN X, W BO, et al. Effect of Multi-Pass Power Spinning on Microstructure Homogenization and Mechanical-Property Strengthening of Ti<sub>2</sub>AlNb-Based Alloy Using Welded Tube Blank[J]. Materials, 2022, 15(3): 1013.
- [25] 卢斌, 王永, 杨锐. Ti-22Al-24Nb-1Mo O 相合金箔材的加工与性能[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): 257-259.  
LU Bin, WANG Yong, YANG Rui. Processing and

- Properties of Ti-22Al-24Nb-1Mo Orthorhombic Alloy Foil[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): 257-259.
- [26] 程军, 毛勇, 于振涛, 等. Ti-25Al-14Nb-2Mo-1Fe 合金的热变形行为及本构方程的建立[J]. 金属热处理, 2015, 40(1): 146-151.
- CHENG Jun, MAO Yong, YU Zhen-tao, et al. Hot Deformation Behavior and Establishment of Constitutive Equation of Ti-25Al-14Nb-2Mo-1Fe Alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(1): 146-151.
- [27] 王新, 卢斌, 王娟华, 等. 退火态  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金板材的超塑性变形行为[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): 289-292.
- WANG Xin, LU Bin, WANG Juan-hua, et al. Superplastic Deformation Behavior of Annealed  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  alloy sheet[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): 289-292.
- [28] 李保永, 蒋少松.  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金超塑性能及四层立筋结构超塑成形/扩散连接工艺[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(1): 103-111.
- LI Bao-yong, JIANG Shao-song. Superplastic Forming/Diffusion Bonding of Ti-22Al-27Nb Alloy Hollow Four-layer Structure[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(1): 103-111.
- [29] 刘志强, 王东君, 祝世强, 等.  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金构件全流程模拟及组织-性能预测[J]. 材料科学与工艺, 2022, 30(2): 1-8.
- LIU Zhi-qiang, WANG Dong-jun, ZHU Shi-qiang, et al. Whole Process Simulation of  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  Alloy Component and Prediction of Its Microstructure and Mechanical Properties[J]. Materials Science and Technology, 2022, 30(2): 1-8.
- [30] 马俊林, 刘雨生, 李萍, 等. 超塑性自由胀形温度对  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  板材壁厚分布的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(5): 172-177.
- MA Jun-lin, LIU Yu-sheng, LI Ping, et al. The Influence of Temperature for Thickness Distribution of  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  Alloy Sheet Formed by Superplastic Free Bulging[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(5): 172-177.
- [31] 阴中炜, 孙彦波, 张绪虎, 等. 粉末钛合金热等静压近净成形技术及发展现状[J]. 材料导报, 2019, 33(7): 1099-1108.
- YIN Zhong-wei, SUN Yan-bo, ZHANG Xu-hu, et al. Near-net Shaping of Titanium Alloy Powders by HIP Technology: a Review[J]. Materials Reports, 2019, 33(7): 1099-1108.
- [32] BACCINO R, MORET F, PELLERIN F, et al. High Performance and High Complexity Net Shape Parts For Gas Turbines: The Isoprec® Powder Metallurgy Process[J]. Materials & Design, 2000, 21(4): 345-350.
- [33] 徐磊, 郭瑞鹏, 吴杰, 等. 钛合金粉末热等静压近净成形研究进展[J]. 金属学报, 2018, 54(11): 1537-1552.
- XU Lei, GUO Rui-peng, WU Jie, et al. Progress in Hot Isostatic Pressing Technology of Titanium Alloy Powder[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(11): 1537-1552.
- [34] 陆恒, 魏青松, 薛鹏举, 等. Inconel625 粉末盘热等静压近净成形过程模拟与验证[J]. 中国机械工程, 2013, 24(19): 2675-2680.
- LU heng, WEI Qing-song, XUE Peng-ju, et al. Numerical Simulation and Verification of Near-net-shaping Inconel625 Powder Disk under Hot Isostatic Pressing[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(19): 2675-2680.
- [35] 卢正冠, 吴杰, 刘羽寅, 等.  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金粉末冶金件的热变形行为和环轧过程的模拟研究[J]. 钛工业进展, 2016, 33(4): 31-35.
- LU Zheng-guan, WU Jie, LIU Yu-yin, et al. Simulation Study on Hot Deformation Behavior and Ring Rolling Process of PM  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  Alloy[J]. Titanium, 2016, 33(4): 31-35.
- [36] 张海洋, 史金靓, 张绪虎, 等. 复杂钛合金进气道热等静压近净成形技术研究[J]. 推进技术, 2022, 43(8): 383-389.
- ZHANG Hai-yang, SHI Jin-liang, ZHANG Xu-hu, et al. Near-Net-Shaping Hot Isostatic Pressing of Complicated Titanium Alloy Air Inlet[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(8): 383-389.
- [37] YAN J L, WU A P, LI Q, et al. Effects of Welding Parameters on Weld Shape and Residual Stresses in Electron Beam Welded  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  Alloy Joints[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(1): 67-76.
- [38] 张建伟, 梁晓波, 程云君, 等. 航空发动机用  $\text{Ti}_3\text{Al}$  合金和  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金研制进展[J]. 钢铁研究学报, 2011, 23: 545-548.
- ZHANG Jian-wei, LIANG Xiao-bo, CHENG Yun-jun, et al. Research and Application of  $\text{Ti}_3\text{Al}$  and  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  Alloys on Aero-Engine[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2011, 23: 545-548.
- [39] POLOZOV I, STARIKOV K, POPOVICH A, et al. Mitigating Inhomogeneity and Tailoring the Microstructure of Selective Laser Melted Titanium Orthorhombic Alloy by Heat Treatment, Hot Isostatic Pressing, and Multiple Laser Exposures[J]. Materials, 2021, (17): 4946.
- [40] SIM K H, WANG G, KIM T J, et al. Fabrication of a High Strength and Ductility Ti22Al25Nb Alloy from High Energy Ball-milled Powder by Spark Plasma Sintering[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 741: 1112-1120.
- [41] 黄晟. 粉末冶金制备  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金力学性能研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2021: 43-70.
- HUANG Sheng. Study on Mechanical Properties of  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  Alloy Prepared by Powder Metallurgy[D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2021: 43-70.
- [42] 卢正冠, 吴杰, 徐磊, 等.  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  异形粉末环件的轧



- 制成形与性能研究[J]. 金属学报, 2019, 55(6): 729-740.
- LU Zheng-guan, WU Jie, XU Lei, et al. Ring Rolling Forming and Properties of  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  Special Shaped Ring Prepared by Powder Metallurgy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2019, 55(6): 729-740.
- [43] 李艳军, 吴爱萍, 李权, 等. 焊接参数对  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金电子束焊接接头焊缝形状和残余应力的影响(英文)简[J]. 中国有色金属学会会刊: 英文版, 2019 (1) 67-76.
- LI Yan-jun, WU Ai-ping, LI Quan, et al. Effects of Welding Parameters on Weld Shape and Residual Stresses in Electron Beam Welded  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  Alloy Joints [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019 (1) 67-76.
- [44] LI Y J, WU A P, LI Q, et al. Mechanism of Reheat Cracking in Electron Beam welded  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  Alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(9): 1873-1881.
- [45] 吴杰, 徐磊, 卢正冠, 等. 热等静压粉末  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金的制备及电子束焊[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(S1): 241-245.
- WU Jie, XU Lei, LU Zheng-guan, et al. Preparation and Electron Beam Welding of HIP Powder Metallurgy  $\text{Ti-22Al-24Nb-0.5Mo}$  Alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(S1): 241-245.
- [46] ZHANG Y, FENG A, QU S, et al. Microstructure and Low Cycle Fatigue of a  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$ -based Lightweight Alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 44(9): 8.
- [47] YUAN L, XIONG J T, DU Y J, et al. Effects of Pure Ti or Zr Powder on Microstructure and Mechanical Properties of  $\text{Ti6Al4V}$  and  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  Joints Brazed with  $\text{TiZrCuNi}$ [J]. Materials Science and Engineering: A, 2020: 788139602.
- [48] HAO Z, WANG D, YANG Z, et al. Microstructure and Mechanical Properties of  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  Alloy and C/C Composite Joints Brazed with Ag-Cu-Zn and Ag-Cu-Zn/Cu/Ag-Cu-Ti filler metals[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2019, 19(4): 1083-1094.
- [49] REN H S, REN X Y, XIONG H P, et al. Nano-diffusion Bonding of  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  to Ni-based Superalloy[J]. Materials Characterization, 2019, 155: 10981-10983.
- [50] ZHU L, LI J, TANG B, et al. Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Diffusion Bonding High Nb Containing  $\text{TiAl}$  Alloy to  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  alloy[J]. Vacuum, 2019, 164: 140-148.