

Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金板材制备及热处理工艺研究

王国栋, 王丹, 薛少博, 苏艳妮, 田云飞, 郭学鹏

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘要: 采用真空自耗电弧炉进行3次熔炼得到 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金铸锭, 铸锭经五火锻造、三火热轧、板材压校、表面处理等工序, 得到规格为 $\delta 1.2 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ 的宽幅薄板。其中, 五火锻造及第一火轧制均在单相区进行, 第二火轧制为换向轧制并在两相区进行, 成品轧制采用保温轧制的方式。结果表明: 保温轧制温度为 $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ 时板形最优, 且经单时效或固溶+时效处理后均为脆性断裂。相比于固溶+时效的热处理方式, 经单时效处理析出的等轴 α_2 相与次生针状 O 相较多, α_2 相尺寸较大, O 相片层细小, 可以提高合金的强度。经固溶+时效处理可以提高合金的延伸率, 但强度略低于单时效。

关键词: Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金; 宽幅薄板; 轧制; 热处理

中图分类号: TG337.6; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2023)01-016-05

Research on Preparation and Heat Treatment Process of Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo Alloy Sheet

Wang Guodong, Wang Dan, Xue Shaobo, Su Yanni, Tian Yunfei, Guo Xuepeng

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo alloy ingot was obtained by three times vacuum consumable arc melting. The ingot was subjected to five-fire forging, three-fire hot rolling, sheet pressing, surface treatment and other processing, and then the wide sheet with the size of $\delta 1.2 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ was obtained. The five-fire forging and first-fire rolling were carried out in the single-phase zone, the second-fire rolling was designed as reversing rolling and carried out in the two-phase zone, and the final product rolling adopted the heat preservation rolling. The results show that when the holding rolling temperature is $1050 \text{ }^\circ\text{C}$, the sheet with the best shape and the fracture mode is brittle fracture after single aging or solution + aging treatment. There are more equiaxed α_2 phase and secondary acicular O phase precipitated by single aging treatment compared with solution + aging treatment, and with larger α_2 phase, finer lamella O phase, which can improve the alloy's strength. After solution + aging treatment, the elongation of the alloy can be increased, but the strength is slightly lower than that of single aging treatment.

Key words: Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo alloy; wide sheet; rolling; heat treatment

近年来, 我国航空航天、国防工业等领域迅猛发展, 对材料的性能及其应用环境等提出了更高的要求, 迫切希望能够减重并提高材料的高温服役性能^[1-2]。钛合金综合性能优异, 是航空航天材料的首选, 但传统钛合金的热强性及抗氧化性能受温度限制, 其最高服役温度为 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[3-5]。因此, 开发比强度高、耐腐蚀性优良和高温性能优异的新型轻

质高温结构材料是当前研究的重点和热点。

Ti₂AlNb 基合金是以正交有序结构 O 相为基础的金属间化合物, 其比强度、比刚度高, 热膨胀系数低, 同时具有优异的高温抗蠕变性能、良好的断裂韧性及抗氧化性能, 是一种综合性能优异的新型轻质高温结构材料, 可在 $600 \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$ 的环境下服役^[6-7]。与镍基、铁基高温合金相比, Ti₂AlNb 基合金具有更高的比强度和更低的密度, 可以大幅度减小自重从而提高发动机的性能和效率, 是当前先进飞行器发动机重要部件及导弹壳体的理想材料, 在

航空航天、国防工业等领域具有很大的发展潜力^[8-17]。

但 Ti₂AlNb 基合金在实际应用过程中存在一些问题亟待解决,如 Ti₂AlNb 基合金板材的制备。Ti₂AlNb 基合金塑性差,加工时易开裂,制备 1~4 mm 厚的薄板存在一定困难,当前还没有成熟的用于制备宽幅大规格 Ti₂AlNb 基合金薄板的工艺。此外, Ti₂AlNb 基合金的相变过程复杂,其显微组织与力学性能之间的关系也亟待研究^[18]。

基于上述问题,以 Ti₂AlNb 基合金——Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 为研究对象,对其宽幅薄板的生产工艺进行探索开发。采用真空自耗电弧炉进行 3 次熔炼,得到 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金铸锭。铸锭经过五火锻造、三火热轧、板材压校、表面处理等工序,最终得到 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金板材。对不同工艺条件下板材的室温力学性能及微观组织进行分析,以期为后续大批量生产提供工艺支撑。

1 实验

以海绵钛、Al-Mo 中间合金颗粒、Al-Nb 中间合金颗粒、铌钛屑为原料,经混料后压制成自耗电极,采用真空自耗电弧炉经 3 次熔炼制得 $\phi 340$ mm \times 560 mm 的 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金铸锭。采用五火锻造将铸锭锻成 105 mm \times 420 mm \times 490 mm 的板坯,五火锻造均在单相区进行。为了不影响后续的热轧开坯,对板坯表面、棱角处的龟裂及较深裂纹彻底进行表面处理,处理后的板坯无裂纹、边部倒角,符合后续轧制要求,规格为 90 mm \times 400 mm \times 430 mm。在 800 mm 热轧机上对 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金板坯进行三火热轧,其中,第一火次轧制在单相区进行;第二火次轧制在两相区进行,采用换向轧制,以获得横纵向力学性能优异的板材;第三火次轧制即成品轧制,采用保温轧制方式。保温轧制温度分别为相变点以上的 1050 $^{\circ}$ C、相变点附近的 1000 $^{\circ}$ C 以及相变点以下的 930 $^{\circ}$ C^[19]。对保温轧制后的板材进行压校、碱酸洗、表面砂光处理,最终得到规格为 $\delta 1.2$ mm \times 600 mm \times 1000 mm 的成品 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金板材。

对保温轧制温度为 1050 $^{\circ}$ C 的 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金板材分别进行时效(760 $^{\circ}$ C/8 h/AC)和固溶+时效(940 $^{\circ}$ C/1 h/WC+760 $^{\circ}$ C/8 h/AC)热处理。

采用 INSTRON 5985 万能材料试验机测量板材的室温力学性能。采用带有电子背散射衍射(EBSD)系统的日本电子 JSM-7900F 热场发射扫描电子显微镜(FESEM)观察显微组织和断口形貌,用 EBSD 系统进行显微结构分析。

2 结果与讨论

2.1 板材制备

Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金铸锭经五火锻造、三火热轧、板材压校、表面处理等工序,得到无裂纹、无翘曲且规格为 $\delta 1.2$ mm \times 600 mm \times 1000 mm 的宽幅薄板,如图 1 所示。在 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金板材热轧成形过程中,3 种保温轧制温度下的板材均未发生粘连现象,并且轧制温度为 1050 $^{\circ}$ C 时板形最好,1000 $^{\circ}$ C 时次之,930 $^{\circ}$ C 时板形较差。对板材厚度进行测量,发现 3 种保温轧制温度下板材的厚度精度都能保证在 0.1 mm 以内。

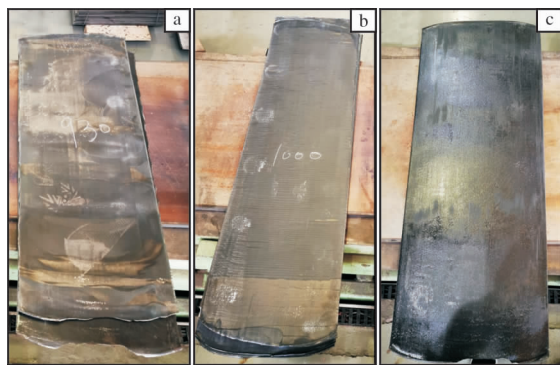


图 1 不同温度下轧制的 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金板材的照片

Fig. 1 Photos of Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo alloy sheet rolled at different temperatures: (a) 930 $^{\circ}$ C; (b) 1000 $^{\circ}$ C; (c) 1050 $^{\circ}$ C

2.2 热处理制度对显微组织的影响

图 2 为 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金板材经不同制度热处理后的显微组织。合金的机械性能很大程度上取决于合金中各种相的微观结构和体积分数^[20-21]。Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金板材经时效处理后,显微组织主要由等轴 α_2 相、板条 O 相和次生细小针状 O 相组成。Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金板材经固溶+时效处理后,显微组织主要由少量等轴 α_2 相、940 $^{\circ}$ C 固溶处理后形成的初生板条 O 相以及 760 $^{\circ}$ C 时效处理后形成的次生细小针状 O 相组成^[22-23]。相比固溶+时效的热处理方式,单时效处

析出的等轴 α_2 相与次生 O 相较多, 且 α_2 相尺寸较大, O 相片层细小。

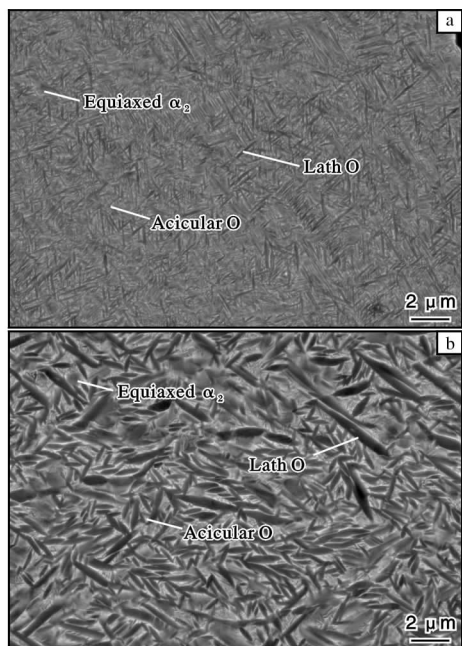


图 2 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金板材经不同制度热处理后的显微组织

Fig. 2 Microstructures of Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo alloy sheet after different heat treatments: (a) aging; (b) solution + aging

图 3 为 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金板材经不同制度热处理后的相分布图。由图 3 可知, 2 种热处理制度下都能获得较高占比的 O 相, 其中时效制度下 O 相占比为 64.2%, 固溶 + 时效制度下 O 相占比达到 77.4%。

图 4 为 2 种不同热处理制度下 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金板材的晶粒尺寸分布图。从图 4 可知, 2 种热处理制度下都能获得纳米级的细小组织, 其中, 时效制度下小于 0.25 μm 的晶粒占比达到 82%, 固溶 + 时效制度下小于 0.25 μm 的晶粒占比达到 72%。细化晶粒对于提升材料强度具有一定的帮助, 晶粒尺寸与强度关系符合 Hall-Petch 效应^[24]。相比之下, 时效制度下 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金板材的强度更高。

2.3 热处理制度对室温力学性能的影响

图 5 为不同热处理制度下 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金板材的室温拉伸应力-应变曲线。室温下, 时效处理后板材的抗拉强度、屈服强度、延伸率分别为 1217 MPa、1192 MPa 和 3.0%, 固溶 + 时效

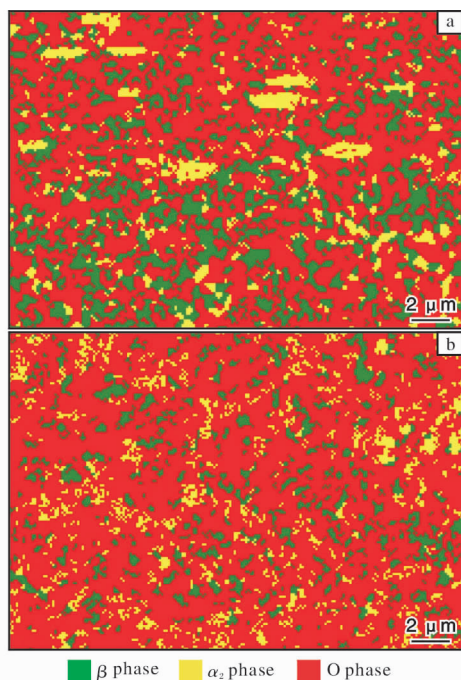


图 3 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金板材经不同制度热处理后的相分布图

Fig. 3 Phase distribution diagrams of Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo alloy sheet after different heat treatments: (a) aging; (b) solution + aging

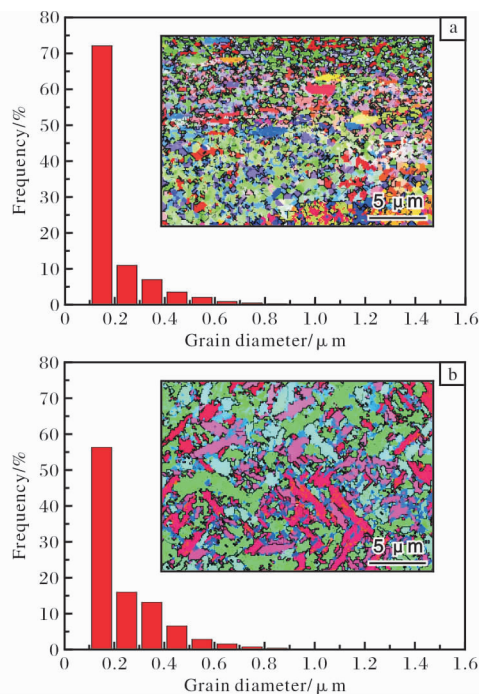


图 4 不同热处理制度下 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金板材的晶粒尺寸分布图

Fig. 4 Grain size distribution of Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo alloy sheet after different heat treatments: (a) aging; (b) solution + aging

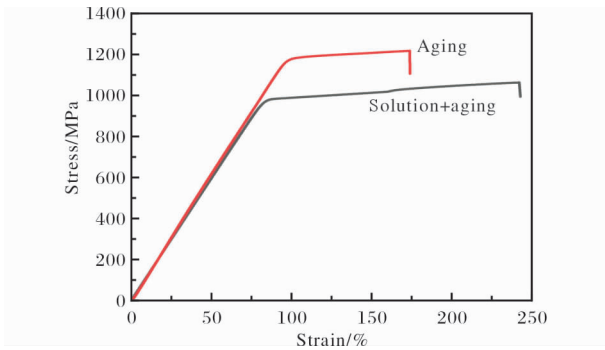


图 5 不同热处理制度下 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金板材的室温拉伸应力-应变曲线

Fig. 5 Tensile stress-strain curves of Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo alloy sheet at room temperature under different heat treatments

处理后分别为 1063 MPa、990 MPa 和 3.5%。与固溶

+时效处理相比,时效处理可以提高合金的强度,但合金的延伸率较低。结合微观组织(图 2)来看,时效处理得到的片层 O 相相较于固溶+时效处理的合金更细,并且 O 相比 α_2 相具有更好的强化效果。另一方面,固溶处理得到的粗片层 O 相使合金有较好的塑性^[25]。综上可知,经时效处理的 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金板材强度更好,但塑性较差。因此,在满足强度要求的条件下,应选择能够获得更好塑性的固溶+时效的热处理方式。

图 6 为不同热处理制度下 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金板材的室温拉伸断口形貌。从图 6 可以看出,2 种热处理制度下的宏观断口均主要由放射区与纤维区组成,纤维区贯穿了整个拉伸试样,放射区沿着纤维区向两端扩展,并且有河流状花样与解理台阶,表现为脆性断裂特征^[22]。

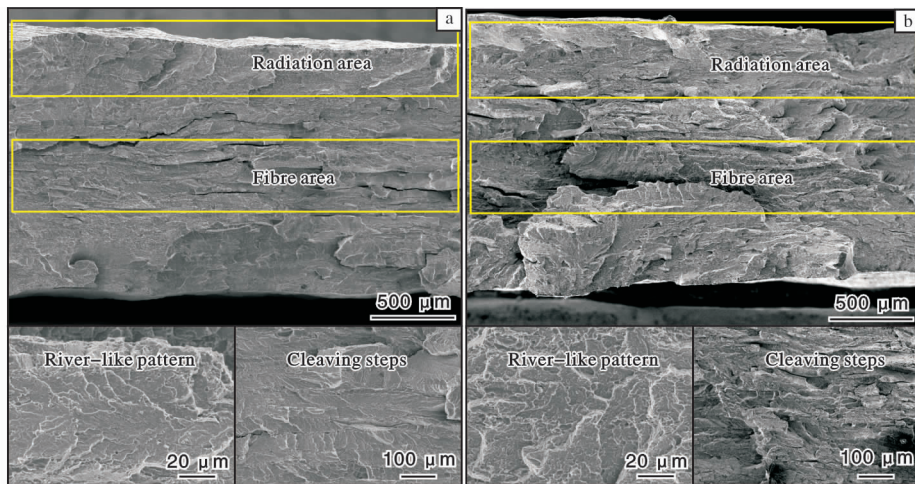


图 6 不同热处理制度下 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金板材的室温拉伸断口形貌

Fig. 6 Tensile fracture morphologies of Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo alloy sheet at room temperature under different heat treatments: (a) aging; (b) solution + aging

3 结 论

(1) Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金铸锭经过五火锻造、三火热轧、板材压校、表面处理等工序成形,最终可得到厚度精度在 0.1 mm 以内的 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金宽幅薄板。当保温轧制温度为 1050 °C 时,板形最优。

(2) 经单时效处理与经固溶+时效处理的 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 合金板材均为脆性断裂。相比于固溶+时效处理,经时效处理析出的等轴 α_2 相与次生细小针状 O 相比较多,且 α_2 相尺寸较大, O 相片层细小,可以提高合金的强度。经固溶+时效处理可

以提高合金的延伸率,但强度略低于单时效。在满足强度要求的条件下,应选择能够获得更好塑性的固溶+时效的热处理方式。

参考文献 References

- [1] 李渤渤. 低密度 Ti_2AlNb 基合金板材制备及组织与力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [2] 陈玮, 李晋伟, 史一宁. Ti_2AlNb 合金及其焊接技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2015(17): 136-139.
- [3] Peters M, Kumpfert J, Ward C H, et al. Titanium alloys for aerospace applications[J]. Advanced Engineering Materials, 2003, 5(6): 419-427.
- [4] Banerjee D. The intermetallic Ti_2AlNb [J]. Progress in

- Materials Science, 1997, 42(1-4): 135-158.
- [5] Banerjee D, Williams J C. Perspectives on titanium science and technology [J]. Acta Materialia, 2013, 61(3): 844-879.
- [6] 沈军, 冯艾寒. Ti₂AlNb 基合金微观组织调制及热成形研究进展[J]. 金属学报, 2013, 49(11): 1286-1294.
- [7] 马雄, 张建伟, 梁晓波, 等. 航空发动机用 Ti₂AlNb 合金的研制进展[C]// 中国金属学会. 第十一届中国钢铁年会论文集. 北京: 冶金工业出版社, 2017.
- [8] 杨晶晶. Ti₂AlNb-O 相合金表面 Al/Al₂O₃ 热防护涂层性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [9] Banerjee D, Gogia A K, Nandi T K, et al. A new ordered orthorhombic phase in a Ti₃Al-Nb alloy[J]. Acta Metallurgica, 1988, 36(4): 871-882.
- [10] Hao Y L, Xu D S, Cui Y Y, et al. The site occupancies of alloying elements in TiAl and Ti₃Al alloys[J]. Acta Materialia, 1999, 47(4): 1129-1139.
- [11] Sastry S M L, Lipsitt H A. Ordering transformations and mechanical properties of Ti₃Al and Ti₃Al-Nb alloys [J]. Metallurgical Transactions A, 1977, 8A: 1543-1552.
- [12] 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.
- [13] Huda Z, Edi P. Materials selection in design of structures and engines of supersonic aircrafts: a review [J]. Materials & Design, 2013, 46: 552-560.
- [14] Choubey G, Suneetha L, Pandey K M. Composite materials used in scramjet - a review [J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(1): 1321-1326.
- [15] Wu H Y, Zhang P Z, Zhao H F, et al. Effect of different alloyed layers on the high temperature oxidation behavior of newly developed Ti₂AlNb-based alloys [J]. Applied Surface Science, 2011, 257(6): 1835-1839.
- [16] Peng J H, Yong M, Li S Q, et al. Microstructure controlling by heat treatment and complex processing for Ti₂AlNb based alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 299(1/2): 75-80.
- [17] Germann L, Banerjee D, Guédou J Y, et al. Effect of composition on the mechanical properties of newly developed Ti₂AlNb-based titanium aluminide [J]. Intermetallics, 2005, 13(9): 920-924.
- [18] Popovich A A, Sufiiarov V S, Polozov I A, et al. Selective laser melting of the intermetallic titanium alloy [J]. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2019, 60(2): 186-193.
- [19] Zhou Y H, Li W P, Wang D W, et al. Selective laser melting enabled additive manufacturing of Ti-22Al-25Nb intermetallic: excellent combination of strength and ductility, and unique microstructural features associated [J]. Acta Materialia, 2019, 173: 117-129.
- [20] Pathak A, Singh A K. A first principles study of Ti₂AlNb intermetallic [J]. Solid State Communications, 2015, 204: 9-15.
- [21] Bo W, Zinkevich M, Aldinger F, et al. Prediction of the ordering behaviours of the orthorhombic phase based on Ti₂AlNb alloys by combining thermodynamic model with abinitio calculation [J]. Intermetallics, 2008, 16(1): 42-51.
- [22] Boehlert C J. Microstructure, creep, and tensile behavior of a Ti-12Al-38Nb (at.%) beta + orthorhombic alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 1999, 267(1): 82-98.
- [23] 王伟, 曾卫东, 江悦, 等. 热处理对 Ti₂AlNb 合金显微组织及力学性能的影响 [J]. 钛工业进展, 2015, 32(1): 16-19.
- [24] 王伟. 基于三种典型显微组织的 Ti-22Al-25Nb 合金力学性能研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
- [25] 刘石双, 曹京霞, 周毅, 等. Ti₂AlNb 合金研究与展望 [J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(11): 3106-3126.

专利信息

一种颗粒增强钛基复合材料增强体分布结构均匀性控制方法

申请号: CN202211219482.0

申请日: 20220930

公开(公告)日: 20230103

公开(公告)号: CN115555570A

申请(专利权)人: 中国航发北京航空材料研究院

摘要: 本发明涉及一种颗粒增强钛基复合材料增强体分布结构均匀性控制方法, 主要包括以下步骤: 选配增强体和基体粉末、低能球磨、超声波洗筛、制备包套、热等静压致密化等。本发明基于大颗粒塑性基体粉末和小颗粒高硬度增强体粉末的混合粉末体系, 在精准设计合理配比的条件下, 采用低能球磨工艺和超声波洗筛措施, 通过包套热等静压工艺制备出增强体分布结构均匀的钛基复合材料, 可大幅提升颗粒增强钛基复合材料组织结构与性能的一致性, 为复合材料构件服役的稳定性和可靠性提供保障。