● 工艺技术 Technology ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.4213

热等静压工艺参数对 TiAl–4522XD 合金组织性能的影响

黄海涛[1],杨 超[1],张国栋[1],唐洪奎[2],张 康[2]
(1. 中国航发商用航空发动机有限责任公司,上海 201100;2. 西安欧中材料科技有限公司,陕西 西安 710000)

摘 要:采用预合金粉末热等静压技术制备 TiAl-4522XD 合金试样,研究热等静压工艺参数(热等静压温度、粉末粒度等)对 TiAl-4522XD 合金组织和性能的影响。发现热压温度为 1 200 ℃时无法实现致密化,组织中残留有原始颗粒边界,使得基体强度较低;热压温度为 1 260 ℃时组织能完全致密化,原始颗粒边界消失,合金抗拉强度显著提高;热压温度升高到 1 300 ℃时,γ 晶粒和硼化物快速长大,γ/α_2 相边界处在热应力下出现微裂纹, 合金室温和高温抗拉强度相对 1 260 ℃时降低。对不同粒度的合金粉末分别进行了 1 260 ℃+4 h 的热等静压,发现其密度均能达到 TiAl-4522XD 合金理论密度,但是粒径范围为 150~212 和 45~212 μm 时,粉末颗粒变形量不均匀,热压试样中局部位置存在微裂纹,而粒度范围为 45~150 μm 时,热压试样组织均匀细小且无明显缺陷。此外,TiAl-4522XD 合金热等静压装粉除气真空度必须达到 10^{-3} Pa,否则会影响组织致密度和粉末变形均匀程度,导致原始颗粒边界处产生裂纹。结果表明,最佳工艺为:采用粒径范围 45~150 μm 的粉末在 1 260 ℃/4 h/10^{-3} Pa 的参数下进行热等静压,热压后能够获得均匀、致密的近 γ 组织,其室温抗拉强度为(698.0±2.0) MPa,高温抗拉强度为(504.5±2.5) MPa。

关键词:TiAl-4522XD 合金;热等静压;组织;性能
中图分类号: TG146.2+3 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2025)02-0187-15

Effect of HIP Processing Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of TiAl–4522XD Alloy

HUANG Haitao[1], YANG Chao[1], ZHANG Guodong[1], TANG Hongkui[2], ZHANG Kang[2]
(1. Aecc Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 201100, China; 2. Xi'an Sino-Euro Materials Technologies Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: A prealloyed powder hot isostatic pressing (HIP) technique was utilized to fabricate a TiAl-4522XD alloy. The effects of HIP processing parameters (temperature and powder particle size) on the microstructure and mechanical properties of TiAl-4522XD alloys were investigated. Densification cannot be achieved at a HIP temperature of 1 200 ℃, with prior particle boundaries (PPBS) in the microstructure, resulting in a low matrix strength. At a HIP temperature of 1 260 ℃, complete densification is achieved, the PPBS disappears, and the tensile strength of the alloy significantly increases. When the hot pressing temperature is increased to 1 300 ℃, γ grains and borides rapidly grow, microcracks appear at the γ/α_2 phase boundaries under thermal stress, and the tensile strengths at both room temperature and high temperatures decrease compared with those at 1 260 ℃. HIP samples with different particle sizes were fabricated at 1 260 ℃ for 4 h. The results show that all the samples reached the theoretical density of the TiAl-4522XD alloy. For the particle size ranges of 150~212 and 45~212 μm, the deformation amount of powder particles is uneven, with microcracks present in the hot-pressed samples; for the particle size range of 45~150 μm, the hot-pressed samples have uniform and fine microstructures without obvious defects. Additionally, the vacuum degree during powder loading and degassing must reach 10^{-3} Pa; otherwise, it affects the density of the microstructure and the uniformity of powder deformation, leading to

收稿日期:2024-10-28
基金项目:中国航发自主创新专项资金项目(ZZCX-2020-007)
作者简介:黄海涛,1995 年生,博士,工程师. 主要从事 TiAl 合金低压涡轮叶片精密铸造工艺研究;TiAl 合金定向凝固技术研究. Email: hithht@163.com
通信作者:杨 超,1983 年生,博士,研究员级高级工程师. 主要从事 TiAl 合金、高强钢等材料的应用研究. Email: 176260856@qq.com
引用格式:黄海涛,杨超,张国栋,唐洪奎,张康. 热等静压工艺参数对 TiAl-4522XD 合金组织性能的影响[J]. 铸造技术,2025,46(2): 187-201.
HUANG H T, YANG C, ZHANG G D, TANG H K, ZHANG K. Effect of HIP processing parameters on the microstructure and mechanical properties of TiAl-4522XD alloy[J]. Foundry Technology, 2025, 46(2): 187-201.

中国知网 https://www.cnki.net

cracks at the PPBS. On the basis of these results, the optimal HIP process is achieved: the powder particle size range is 45~150 μm, and the HIP parameters are 1 260 ℃/4 h/10^{-3} Pa. Under these conditions, a uniform and dense near-γ microstructure is obtained, with a room temperature tensile strength of (698.0±2.0) MPa and a high-temperature tensile strength of (504.5±2.5) MPa.

Key words: TiAl-4522XD alloy; hot isostatic pressing; microstructure; properties

TiAl 合金是一种轻质耐热结构材料，其密度仅为镍基高温合金的 1/2 左右(3.8~4.2 g/cm^3)，具有密度低、熔点高、比强度高及抗蠕变性能好等特点，在航空航天、汽车工业等领域具有极大的应用潜力[1-2]。在航空发动机低压涡轮中采用 TiAl 合金叶片可以大幅减轻发动机质量，提高发动机推重比、燃油效率和减少污染物排放[3-4]。但是 TiAl 合金的室温塑性和机械加工性较差，限制了其应用范围[5-6]。此外，在目前常用的精密铸造工艺制备的 TiAl 合金中，依然存在组织粗大、缩松、宏观和微观偏析难以控制等问题[7-8]。随着 TiAl 合金粉末制备技术和粉末冶金技术的进步[9]，以及对 TiAl 合金粉末热等静压过程中组织演变规律认识的加深[10]，TiAl 合金粉末热等静压近净成形工艺日益成熟。在热等静压 TiAl 合金组织和性能研究方面已取得一定成果[11-13]，能够制备出晶粒细小、组织均匀致密、力学性能优异的 TiAl 合金试样[14]。近年来，关于 TiAl 合金粉末热等静压坯料包套挤压、包套锻造等后续变形工艺[15]以及热处理工艺[16]等方面的研究也有一定的报道，进一步完善了 TiAl 合金粉末热等静压近净成形工艺路径。然而，TiAl 合金固态相变过程较为复杂，热等静压态合金组织和性能受工艺参数影响很大，因此需系统研究各热等静压参数对 TiAl 合金组织性能的影响，获得最佳工艺窗口，以充分发挥热等静压 TiAl 合金的应用潜能。

本研究采用超高转速等离子旋转电极法(super speed plasma rotation electrode process, SS-PREP)制备 TiAl-4522XD 合金粉末，并对其进行了热等静压，系统研究了热等静压温度、粉末粒度、除气真空度等参数对粉末热等静压 TiAl-4522XD 合金组织和性能的影响。获得了不同粉末热等静压工艺下，TiAl-4522XD 合金相组成、致密度、晶粒尺寸和拉伸性能等的演变规律。

1 实验材料与方法

采用真空自耗电弧熔炼加真空感应熔炼制备的 TiAl-4522XD 合金棒材作为制粉原料，采用超高转速等离子旋转电极法制备合金粉末，制粉工艺参数如表 1 所示。完成制粉后，在氩气环境中将TiAl-4522XD 合金粉末填入尺寸为ϕ89 mm×90 mm 的钢制包套内，充分除气并封焊后，采用热等静压工艺致密化成形，获得热等静压 TiAl-4522XD 合金试样。为了研究热等静压和热处理工艺参数对 TiAl-4522XD 合金组织和性能的影响，在热等静压工艺中分别采用了不同的热等静压温度、粉末粒度、除气真空度，具体参数值见对应章节处。获得热等静压态的 TiAl-4522XD 合金试样后，采用线切割在其内部切割尺寸为15 mm×15 mm×15 mm 的金相试块。对其进行砂纸打磨、抛光后使用 Kroll 试剂(1%HF+6%HNO_3 水溶液，体积分数)腐蚀 10 s，分别采用光学金相显微镜和扫描电子显微镜检测了试样基体的显微组织和元素分布。采用布鲁克 D8 X 射线衍射仪对 TiAl-4522XD 合金试样的相组成和相含量进行了分析，具体参数为：Cu靶、电压 40 kV、电流 30 mA、衍射角 2θ 变化范围为 20°~90°。在热等静压 TiAl-4522XD 合金锭中切取拉伸试样，分别测试了室温拉伸性能和 650 ℃高温拉伸性能，具体实验方法依据 ASTM E8/8M 和 ASTM E21 执行。

表1 SS-PREP工艺参数
Tab.1 Processing parameters of SS-PREP

Rotate speed /(r·min^{-1})	Current/A	Voltage/V	Feed speed /(mm·min^{-1})
28 000±50	1 350±200	55~67	15

2 实验结果及讨论

2.1 粉末制备和表征

对制备粉末所采用的 TiAl-4522XD 母合金棒材进行物相分析，XRD 分析其结果如图 1 所示。经 MDI Jade 标定，母合金中主要物相为 TiAl(γ 相)和 Ti_3Al(α_2 相)。TiAl-4522XD 母合金棒材金相组织照片和扫描照片如图 2 和 3 所示。图中可见母合金棒材主要由片层团构成，片层团之间的边界呈锯齿状。

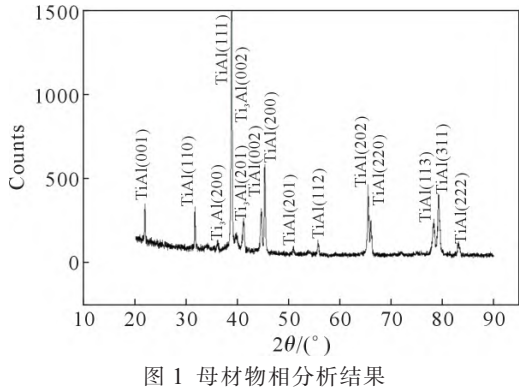

图 1 母材物相分析结果
Fig.1 XRD patterns of the TiAl-4522XD master alloy

中国知网 https://www.cnki.net

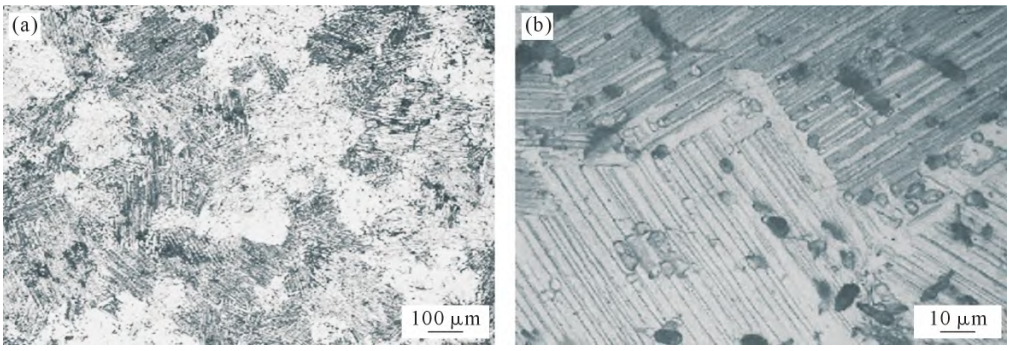

图 2 TiAl-4522XD 母合金棒材金相照片：(a) 100x; (b) 1 000x
Fig.2 OM images of the TiAl-4522XD master alloy: (a) 100x; (b) 1 000x

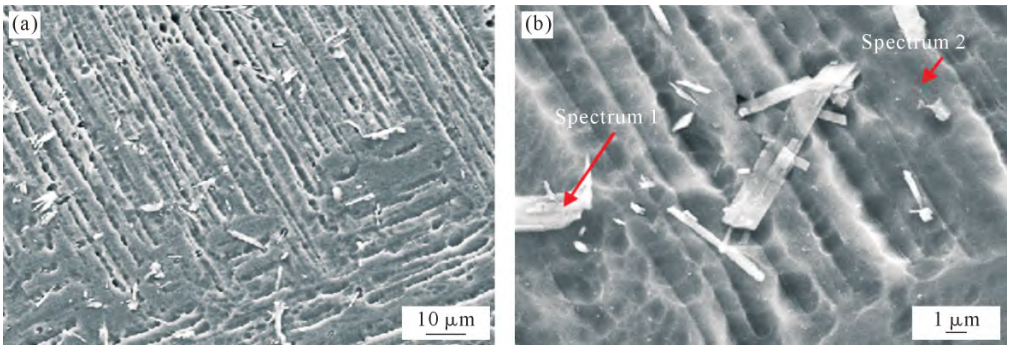

图 3 TiAl-4522XD 母合金棒材显微组织：(a) 1 000x; (b) 5 000x
Fig.3 Microstructures of the TiAl-4522XD master alloy: (a) 1 000x; (b) 5 000x

片层团内主要由交替分布的 γ 相和 α_2 相片层构成，和母合金物相分析结果一致。根据 4~5 张不同位置处金相照片的统计结果，TiAl-4522XD 母合金棒材中片层团平均尺寸约 250 μm，平均片层间距 2~3 μm。从图 2 和 3 中可见，片层团内部弥散分布有平均尺寸约为 4.5 μm 的黑色颗粒，其在扫描电镜二次电子模式下为白色条状。对弥散的白色条状相进行能谱分析(位置如图 3b)，结果如表 2 所示。可见白色条状相富含 B 元素，参考相图和已有文献，白色条状相可能为 TiB 或 TiB_2、Ti_3B_4 相[17-18]。

表2 TiAl–4522XD合金母合金能谱分析结果
Tab.2 EDS analysis of the TiAl–4522XD master alloy
(mass fraction/%)

Element	B	C	Al	Ti	Mn	Nb	Total
Spectrum 1	26.58	12.30	19.07	37.77	2.07	2.21	100.00
Spectrum 2	0	6.21	29.33	58.21	2.87	3.38	100.00

采用 PREP 法制粉，对 TiAl-4522XD 合金母合金和粉末的化学成分进行测试，结果如表 3 所示，可见将原材料棒材制备成粉末的过程中，通粉与原材料成分无明显变化，均满足技术要求。PREP 法制备的 TiAl-4522XD 合金粉末粒度范围为 45~212 μm，由于不同粒径的粉末具有不同的表面/质量比，对不同粒径范围粉末的含氧量分别测试，结果如图 4。由于小粒径粉末的表面比更大，更易吸附气体分子，因此小粒径粉末氧含量相对更高。

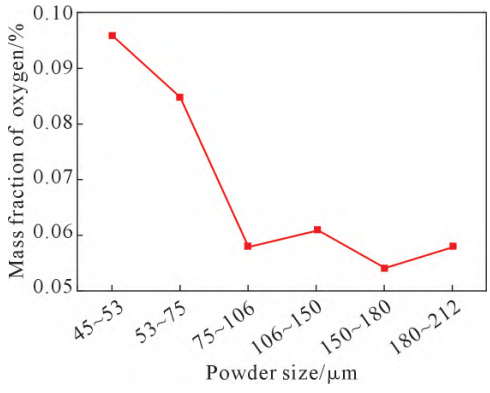

图 4 TiAl-4522XD 不同粒度粉末氧含量变化
Fig.4 Variation in the oxygen content of TiAl-4522XD powders with diameter

图 5 为 TiAl-4522XD 合金粉末扫描照片，从图中可见粉体颗粒表面光滑，均呈球型，无卫星粉和异形粉。图 6 和 7 分别为粉末截面的金相显微组织和 SEM 照片，由于粉末形成过程中冷却速率较高，无

表 3 TiAl–4522XD 合金母材和粉末成分测试结果
Tab.3 Composition analysis of the TiAl–4522XD master alloy and PREP powders
(mass fraction/%)

Element	Al	Mn	Nb	B	Fe	C	O	N	Si	H	Y
Master alloy	30.6	3.28	4.30	0.24	0.015	0.008	0.063	0.007 4	<0.03	<0.001 0	<0.005
PREP powder	30.9	2.96	4.10	0.24	0.014	0.010	0.050	0.003 8	<0.03	0.001 1	<0.005

中国知网 https://www.cnki.net

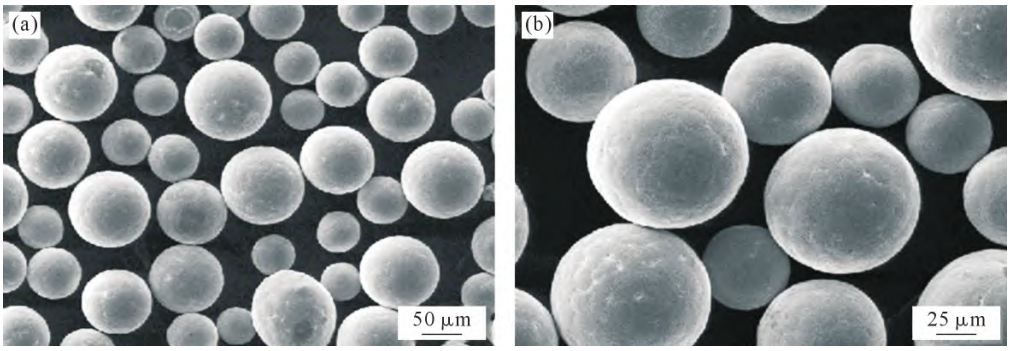

图 5 TiAl-4522XD 粉体表面形貌：(a) 500x; (b) 1 000x
Fig.5 Surface morphology of the TiAl-4522XD powders: (a) 500x; (b) 1 000x

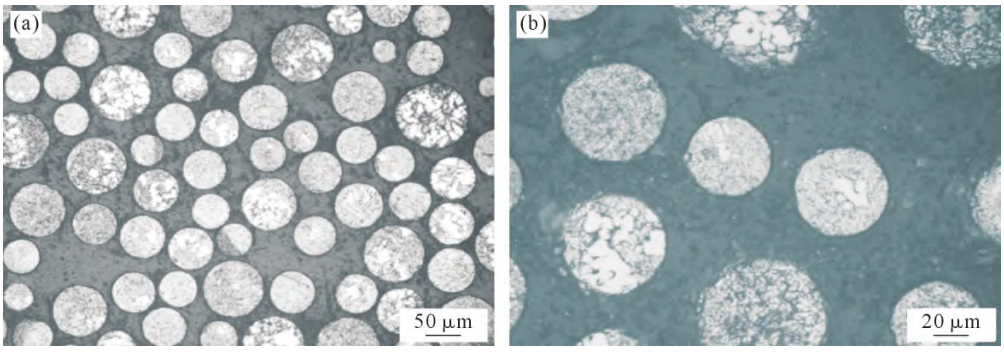

图 6 TiAl-4522XD 粉体内部显微组织：(a) 500x; (b) 1 000x
Fig.6 Inner microstructure of the TiAl-4522XD powders: (a) 500x; (b) 1 000x

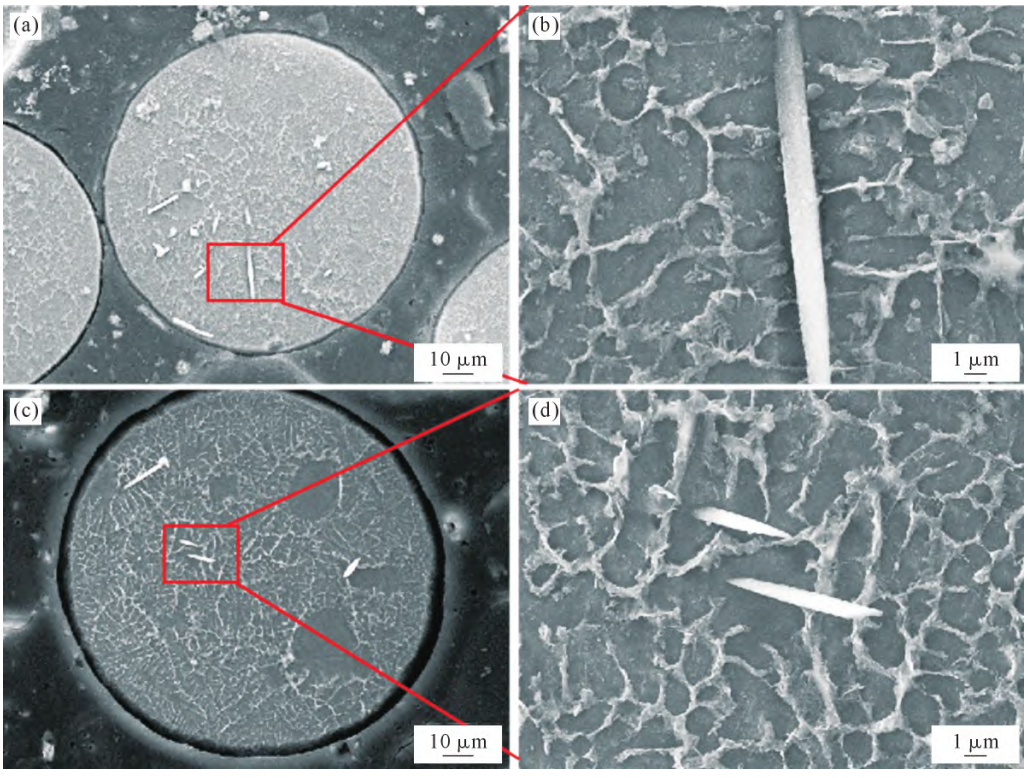

图 7 TiAl-4522XD 粉末截面形貌：(a, b) 粉末粒度 45~106 μm；(c, d) 粉末粒度 106~150 μm
Fig.7 Cross-sectional microstructure of the TiAl-4522XD powders: (a, b) particle size of 45~106 μm; (c, d) particle size of 106~150 μm

论粗、细粉末其内部都形成了胞状晶组织。母合金中的第二相颗粒在粉末中依然存在，分布在晶胞周围和内部。

为检验粉末成分均匀性以及定性分析粉末中第二相元素构成，本研究对粉末及第二相进行能谱分析，结果如图 8 和 9 所示。可见粉末中主要构成元素为：Ti、Al、Nb、Mn、B，与前文中成分检测结果一致。面扫描和线扫描分析结果显示，在 45~106 μm、106~150 μm 粒度范围的粉末内，基体相中 Ti、Al、Nb、Mn 元素的分布都较为均匀，无明显偏析。第二

中国知网 https://www.cnki.net

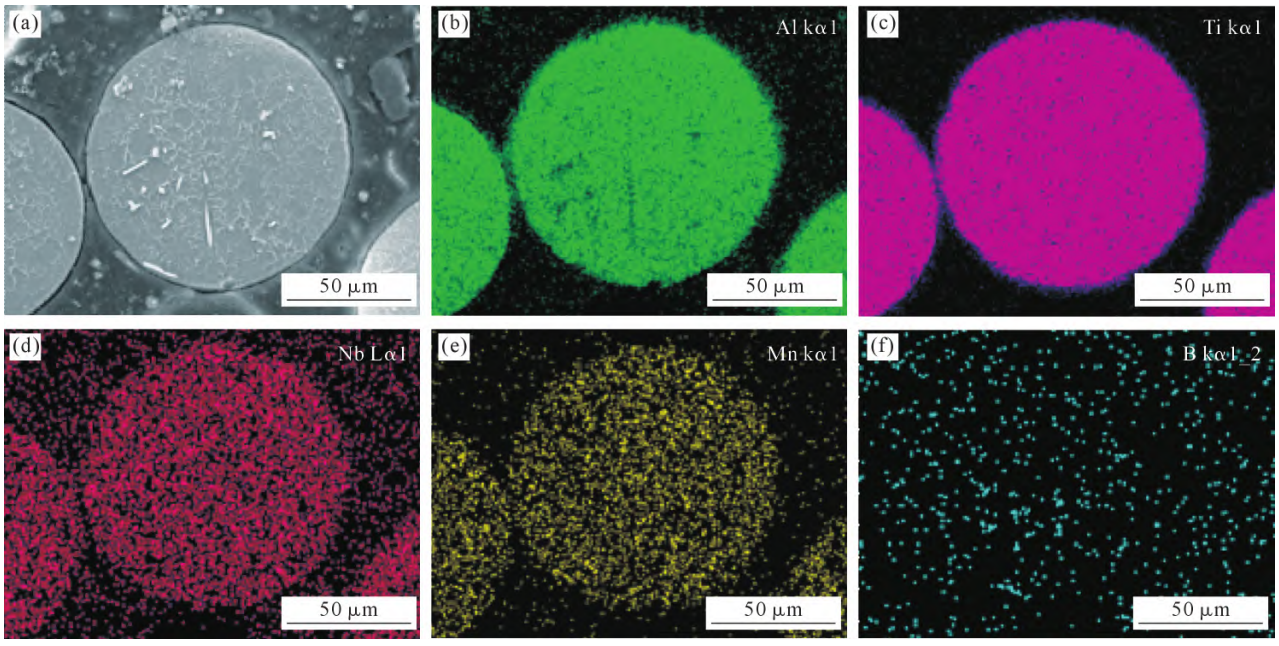

图 8 TiAl-4522XD 合金粉末 EDS 面扫描结果：(a) SEM 照片；(b) Al 元素；(c) Ti 元素；(d) Nb 元素；(e) Mn 元素；(f) B 元素

Fig.8 EDS mapping of TiAl-4522XD powders: (a) SEM image; (b) Al; (c) Ti; (d) Nb; (e) Mn; (f) B

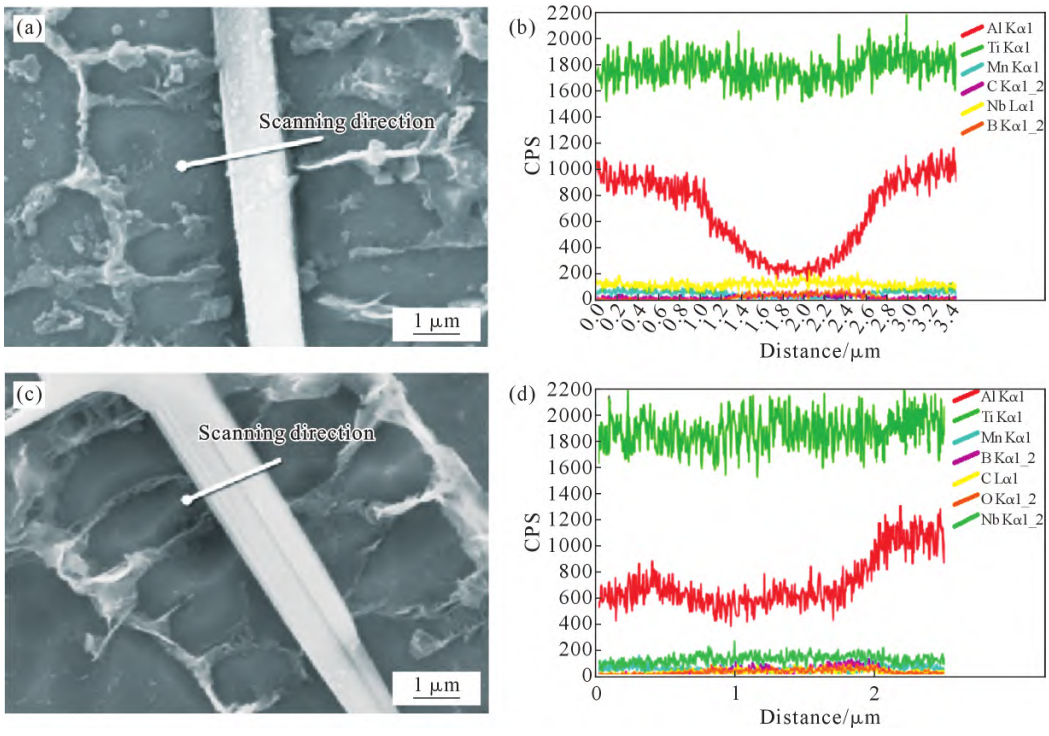

图 9 TiAl-4522XD 合金粉末中析出相能谱分析：(a, b) 粒度 45~106 μm；(c, d) 粒度 106~150 μm

Fig.9 EDS analysis of the precipitated phase in the TiAl-4522XD powders: (a, b) particle size of 45~106 μm; (c, d) particle size of 106~150 μm

相中 Al 元素含量相对较低，Ti、B、Nb 元素含量相对较高，和其他研究中合金元素分析结果一致[19]。

图 10 为不同粒度粉末物相分析结果，不同于 TiAl-4522XD 母材是由 γ 相和 α_2 相两相构成，粒度小于 106 μm 粉末完全由 α_2 相构成，而粒度大于 106 μm 粉末由 γ 相和 α_2 相构成，且随着粉末粒度的增大 α_2 相衍射峰逐渐降低、γ 相衍射峰逐渐升高。在制粉过程中，粉末凝固后自 α 相区冷却时，会进行 $\alpha\rightarrow\alpha_2$ 和 $\alpha\rightarrow\gamma$ 相两种相变过程。这两个相变中，$\alpha\rightarrow\alpha_2$ 为有序化转变，不受冷却速率影响，而 $\alpha\rightarrow\gamma$ 相变受传质过程限制，在较高冷速下被抑制。由于粒度较小的粉末冷却速率更大，其中 $\alpha\rightarrow\gamma$ 相变受限程度也越大，因此粉末粒度越小，γ 相含量越低。

采用同步热分析仪测试了粉末体在氩气环境下连续加热过程中的相转变行为，如图 11 所示。粉末粒度范围 45~150 μm 和 150~212 μm 粉末热流曲线分别出现了一个放热峰和两个吸热峰。其中粒度 45~150 μm 粉末相变放热峰出现在 655 ℃，发生 $\alpha_2\rightarrow\gamma$

中国知网　https://www.cnki.net

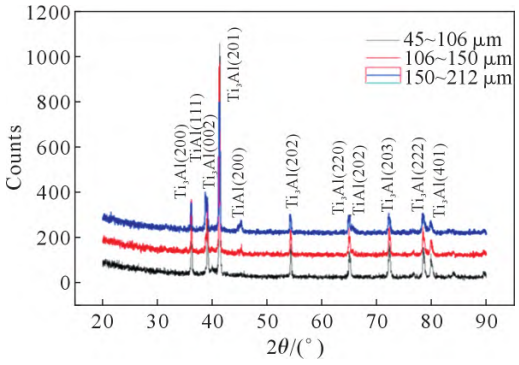

图 10 不同粒度粉末物相分析结果

Fig.10 XRD patterns of TiAl-4522XD powders with different diameters

相变；1 144 ℃发生 $\alpha_2+\gamma\rightarrow\alpha$ 吸热反应；1 287 ℃发生 $\alpha+\gamma\rightarrow\alpha$ 吸热反应。粒度 150~212 μm 粉末相变放热峰出现在 763 ℃，为 $\alpha_2\rightarrow\gamma$ 相变；1 144 ℃发生 $\alpha_2+\gamma\rightarrow\alpha$ 吸热反应；1 287 ℃发生 $\alpha+\gamma\rightarrow\alpha$ 吸热反应，与 45~150 μm 粉末的吸热反应峰值位置一致。从两种不同粒度粉末的热流曲线可以看出，细粉(45~150 μm)低温放热反应 $\alpha_2\rightarrow\gamma$ 的温度比粗粉低。TiAl 合金中的片层组织形成于 α 单相区进入 α+γ 两相区的温度点，故在热等静压和热处理过程中，$\alpha+\gamma\rightarrow\alpha$ 的转变温度是一个重要的控制温度点，可为相关温度的设定提供参考。

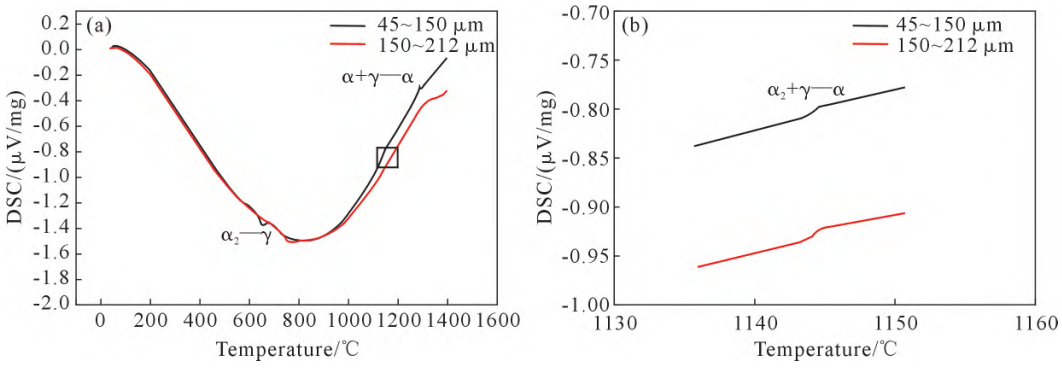

图 11 不同粒度 TiAl-4522XD 合金粉末粒度的 DSC 曲线：(a) 25~1 400 ℃；(b) (a)中框选区域放大图

Fig.11 DSC curves of TiAl-4522XD powders with different diameters: (a) 25~1 400 ℃; (b) enlarged image of the squared area in (a)

2.2 热等静压工艺参数对 TiAl–4522XD 合金组织和性能的影响

为系统研究热等静压工艺对 TiAl-4522XD 合金组织和性能的影响，优化了制备工艺，采用不同的热等静压温度、粉末粒度等工艺参数制备 TiAl-4522XD 合金试样。对不同工艺参数下热等静压态试样的密度、物相、显微组织和力学性能进行对比分析，获得组织均匀致密、力学性能良好的热等静压试样，为后续热处理工艺优化打下基础。

2.2.1 热等静压温度对 TiAl-4522XD 合金组织和性能的影响

为研究温度对 TiAl-4522XD 合金热等静压试样组织和性能的影响，采用不同温度分别进行了热等静压试验，具体参数如表 4 所示。由于 TiAl 合金化学活性较强，在高温热压过程中易和包套材料发生反应[20-21]。为了降低反应程度，减少 TiAl 合金和包套材料在高温下的接触时间，本研究在 45XD-1-5 试样中采用了双温热等静压法，即先在 1 200 ℃进行预压成形，获得基本致密的组织，然后去除包套，并在 1 320 ℃下高温二次热压成形，进一步提高致密度和组织均匀性。

表 4 热等静压参数

Tab.4 HIP processing parameters

Specimen number	Particle size /μm	HIP temperature /℃	Holding time/h	Pressure /MPa
45XD-1-1	45~150	1 200	4	150
45XD-1-2		1 260		
45XD-1-3		1 300		
45XD-1-4		1 200+1 320		

2.2.1.1 热等静压温度对 TiAl-4522XD 合金密度的影响

采用阿基米德排水法测试了不同热等静压温度下 TiAl-4522XD 合金和铸态合金的密度，结果如图 12 所示。由于 TiAl 铸棒中存在一定量的缩松，各温度下的热等静压试样密度均大于铸态试样密度且大致随热等静压温度的增大而增大。当热等静压

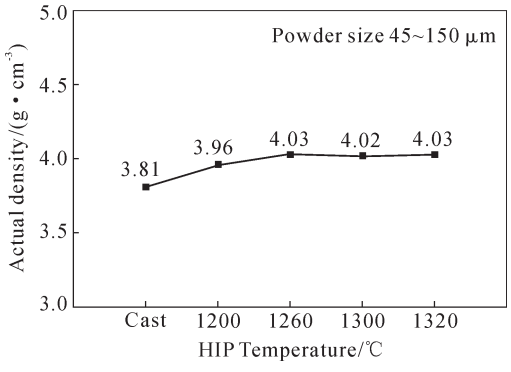

图 12 不同 HIP 温度下 TiAl 合金密度

Fig.12 Density of TiAl alloys with different HIP temperatures

中国知网 https://www.cnki.net

温度为 1 200 ℃时，TiAl-4522XD 合金真实密度最低为 3.96 g/cm³，当温度高于 1 260 ℃时，合金真实密度趋于一致，不再随温度上升而变化，稳定在4.02 g/cm³左右，说明温度高于 1 260 ℃可实现TiAl-4522XD 合金全致密化。

2.2.1.2　热等静压温度对 TiAl-4522XD 合金组织的影响

不同热等静压温度下 TiAl-4522XD 合金试样的 XRD 检测结果见图 13 所示。各热等静压温度下，合金相组成一致，均为 γ 相和 α_2 相。此外从图 13 中可见，随着热等静压温度的升高，α_2 相的衍射峰不断变高，说明 α_2 相的占比逐渐增加，即热等静压过程中 γ 相向 α 相转变逐步充分。

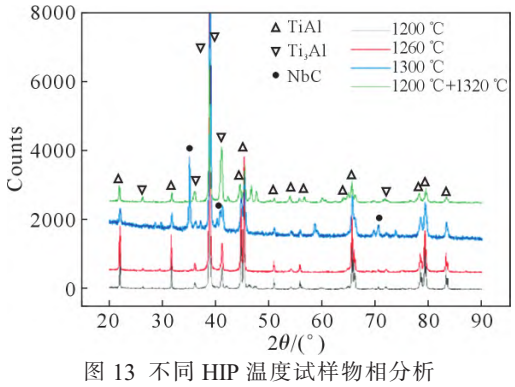

图 13　不同 HIP 温度试样物相分析

Fig.13　XRD patterns of samples subjected to different HIP temperatures

不同温度热等静压 TiAl-4522XD 合金试样组织如图 14 和 15 所示。1 200 ℃热压试样抛光后无肉眼可见的裂纹，但存在少量孔洞。腐蚀后的金相照片中可以观察到明显的原始颗粒边界，如图 14a 所示。组织中还存在明显的微裂纹，这些裂纹以穿过原始颗粒内部或沿原始颗粒边界两种方式扩展。1 200 ℃热压后，TiAl-4522XD 合金基体中的主要组成相为等轴 γ 相和少量 α_2 相，等轴 γ 相周围分布极少量片层组织，γ 相晶粒平均尺寸约 3 μm，在 γ 相基体上还分布着大量不均匀析出的块状或针状相。1 260 ℃热压试样抛光态表面质量良好，无孔隙和肉眼可见的微裂纹缺陷，金相照片中合金粉末原始边界也基本消失，颗粒发生明显变形。组织主要为不均匀的近 γ 相组织，由粗大 γ 晶粒和被 α_2 晶粒所钉扎的呈串联状细 γ 晶组成，未观察到片层结构。但是 γ 相基体内部析出了少量等轴 α_2 相，整体晶粒尺寸较 1 200 ℃热等静压组织明显增大，γ 相平均尺寸增大到约8 μm。热等静压温度升至1 300 ℃时，抛光态表面无明显缺陷，金相照片中可见此时组织基本完全由片层团构成，片层团尺寸约 44 μm。片层团内部的片层间距平均值约 3 μm。在片层团内部，存在少量沿片层边界分布的显微裂纹，如图 15c 所示。图 15d~f 为 1 200 ℃+1 320 ℃双温热等静压法制备试样的金相照片，此时抛光态表面出现明显的连续裂纹，推测为 1 200 ℃热等静压后产生的微裂纹在1 320 ℃下的二次热等静压过程中无法愈合，反而在热应力的作用下发生了继续扩展。此外，多组片层组织照片的统计结果显示 1 200 ℃+1 320 ℃双温热等静压后，TiAl-4522XD 合金片层组织较 1 300 ℃明显粗化，片层间距平均值约为 8 μm。

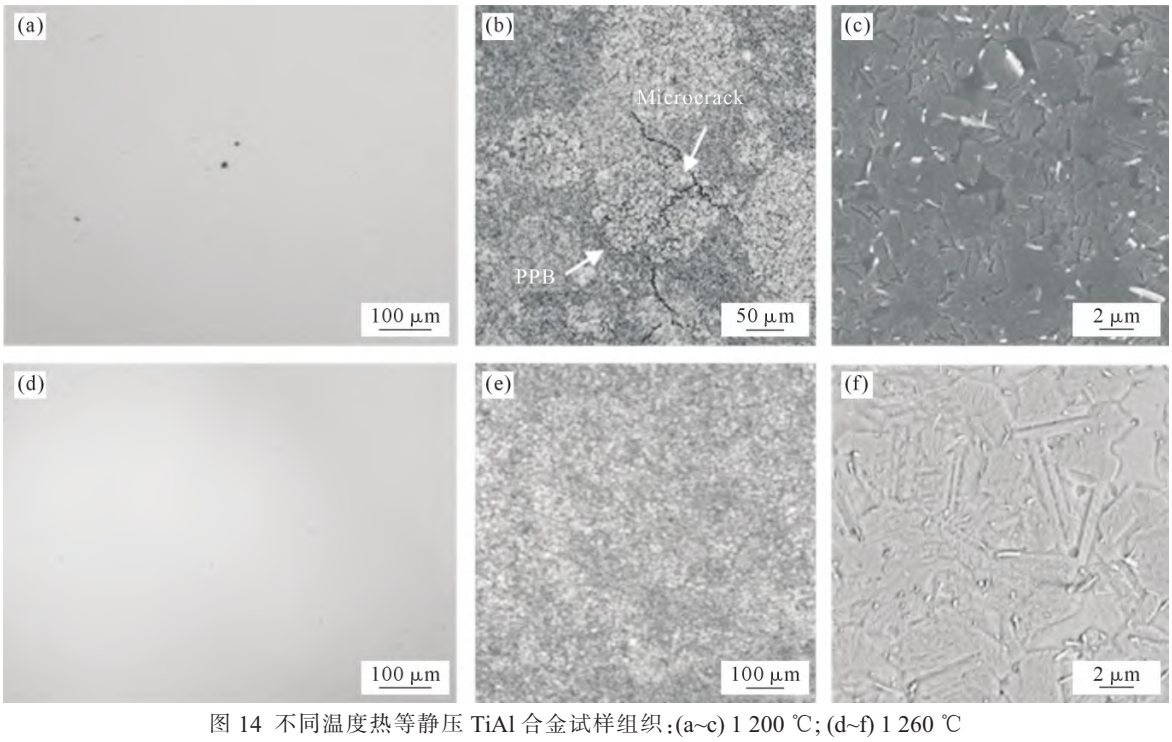

图 14　不同温度热等静压 TiAl 合金试样组织：(a~c) 1 200 ℃；(d~f) 1 260 ℃

Fig.14　Microstructures of TiAl-4522XD with different HIP temperatures: (a~c) 1 200 ℃; (d~f) 1 260 ℃

中国知网　https://www.cnki.net

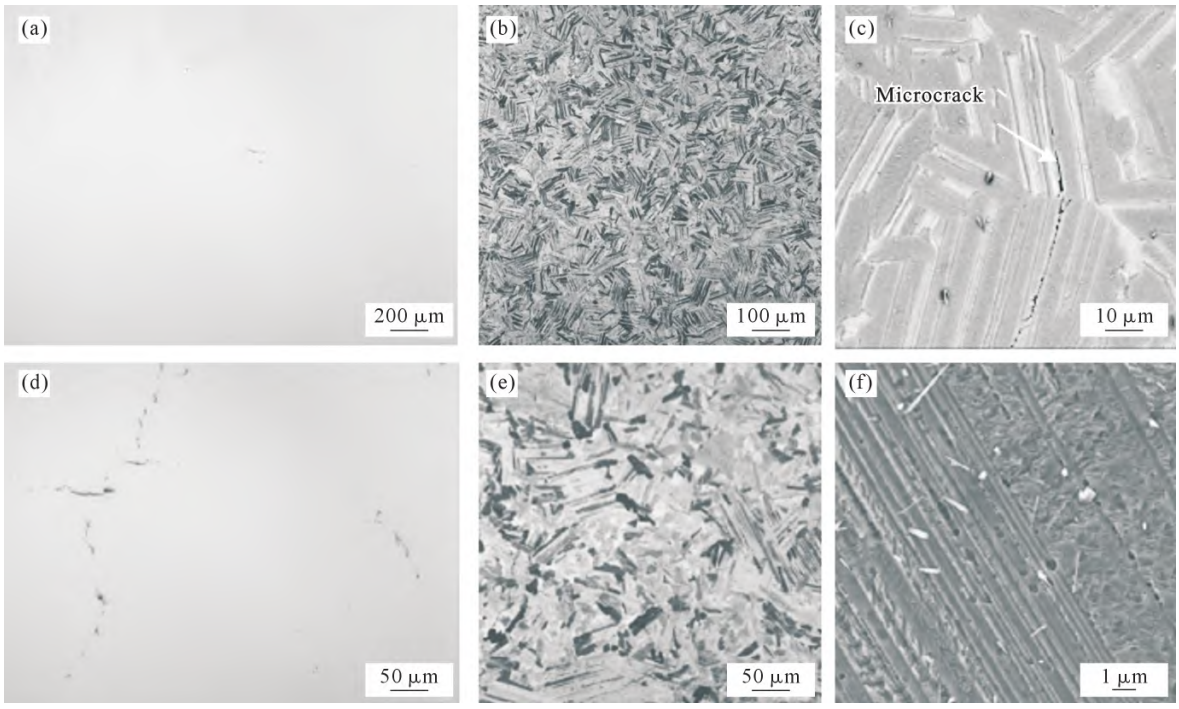

图 15 不同温度热等静压 TiAl 合金试样金相照片:(a~c) 1 300 ℃; (d~f) 1 200 ℃+1 320 ℃
Fig.15 Microstructures of TiAl-4522XD with different HIP temperatures: (a~c) 1 300 ℃; (d~f) 1 200 ℃+1 320 ℃

可以发现,除 1 260 ℃,其他热等静压温度下制备的 TiAl-4522XD 合金试样中均有不同程度的微裂纹产生。1 200 ℃热等静压态合金中,裂纹沿原始颗粒边界分布,或直接穿过细小的 γ 相,呈“放射状”连续扩散。这是因为 TiAl 预合金粉末表面具有一定深度的氧化层,在热等静压过程中,这层氧化层在粉末颗粒交界处形成氧元素富集区。有研究显示氧含量增大会限制 $\alpha\rightarrow\gamma$ 转变,并促进 $\alpha\rightarrow\alpha_2+\gamma$ 共析相变过程,促使 α_2 产生[22],从而使交界处产生与基体内部不同的显微组织。此外,原始颗粒边界的力学性能显著低于基体[23-24],在热等静压过程中热应力和相变应力的作用下,原始颗粒边界处容易率先破裂并成为裂纹的萌生来源和扩展路径。在 1 300 ℃热等静压试样中,显微裂纹沿片层界面扩展。由于面心立方结构的 γ 相比密排立方结构的 α_2 相更容易变形,在热应力作用下,γ 相内首先开始滑移变形,当变形量达到一定程度后,由于 γ 相和 α_2 相内的变形程度不同,在 γ/α_2 相界上产生应力集中和应变不相容。当 γ 与 α_2 之间的相界无法容纳两相之间的应变差时,就会导致 γ 相与 α_2 相沿片层界面分离。由于 γ 与 α_2 之间的界面结合较弱且沿直线分布,十分利于裂纹扩展,于是在 γ/α_2 相界面上产生了微裂纹。在 1 200 ℃+1 320 ℃热等静压试样中的裂纹,则是由于在 1 200 ℃下产生了沿原始颗粒边界分布的裂纹,如前所述此裂纹表面氧元素含量较高,在氧化层的作用下,在 1 320 ℃的热压下无法使这种裂纹愈合,且在更大的热应力和相变应力下,裂纹再次扩展。

在不同热压温度的 TiAl-4522XD 合金中能够观察到两种析出相:一种为颗粒状或短棒状,尺寸范围为几到十几微米;另一种为板条或针状,尺寸为几微米,其形貌如图 16 所示。利用能谱对析出相成分进行定性分析(表 5),结果显示析出相主要构成元素为 Ti-Al-B 和 Ti-Al-B-C,这与文献中的研究结果一致,析出相应为硼化物相[25]。根据 Hyman 等[26]的研究,TiAl 合金中的硼化物相可以分为 TiB 和 TiB_2 两种。TiB 为基体初生相凝固前析出的,一般情况下其厚度大于 10 μm,长度在 100 μm 以上,而 TiB_2 一般为薄片状,较为细小,其厚度一般在 1 μm 以下。有研究发现,硼化物尺寸小于等于几十纳米的显微组织具有较好的室温塑性[27],而当尺寸增大到几百微米时,由于硼化物为微裂纹形核提供场所,因此对应室温塑性显著降低。图 17 为不同热等静压温度下,

表5 析出相能谱分析结果
Tab.5 EDS analysis of the precipitated phase
(atomic fraction/%)

Element	Rod-like precipitate (SPC001)	Acicular precipitate (SPC004)
B	64.53±0.18	39.10
Al	9.20±0.05	11.15
Ti	24.29±0.07	37.05
Mn	0.29±0.01	1.29
Fe	0.25±0.01	-
Nb	1.45±0.02	3.78
Total	100.00	100.00

中国知网 https://www.cnki.net

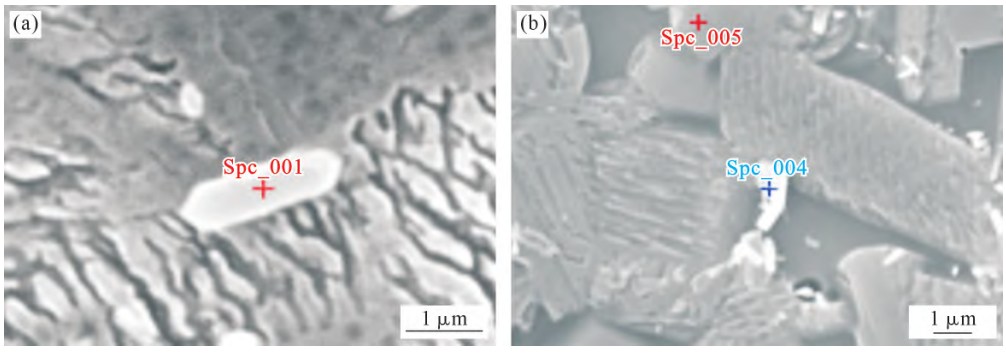

图 16 不同温度热等静压 TiAl 合金中析出相形貌：(a) 短棒状析出相，1 200 ℃；(b) 针状析出相，1 260 ℃

Fig.16 Morphology of the precipitated phase in TiAl-4522XD with different HIP temperatures: (a) rod-like precipitate at 1 200 ℃; (b) acicular precipitate at 1 260 ℃

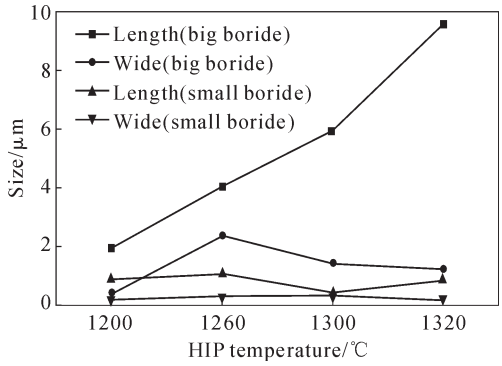

图 17 不同 HIP 温度下析出相(硼化物)长宽比

Fig.17 Length width ratios of the precipitated phase at different HIP temperatures

硼化物相长度、宽度变化，可看出板条状或针状细小硼化物尺寸无明显变化，而颗粒状或短棒状硼化物随温度升高呈线性增大趋势，尤其当热等静压温度升至 1 320 ℃时大颗粒硼化物异常长大。

2.2.1.3　热等静压温度对 TiAl-4522XD 合金拉伸性能的影响

为研究热等静压温度对 TiAl-4522XD 合金力学性能的影响规律，测试了不同热压温度下TiAl-4522XD 合金的室温拉伸性能和 650 ℃高温拉伸性能。结合不同温度热等静压试样的组织分析结果，选择最佳热等静压温度。1 200 ℃热等静压的 TiAl-4522XD 合金致密化程度不足，组织内部存在裂纹，力学性能试棒在加工过程中就会发生开裂碎断，故无法测试。其他试样的测试结果如表 6 所示。1 260 ℃热等静压态试样的室温拉伸抗拉强度值较稳定，为(698±2) MPa，此温度下合金室温强度最高。随热等静压温度升高，合金室温强度呈下降趋势。这是因为1 300 ℃和 1 200 ℃+1 320 ℃热等静压试样中均存在显微裂纹，由于 TiAl 合金的本征脆性，对裂纹极为敏感，在拉伸过程中，微裂纹的存在会大大加速组织变形过程中的裂纹扩展进程，从而导致应力集中和提前断裂。这种提前断裂现象的发生也导致1 300 ℃和 1 200 ℃+1 320 ℃热等静压试样拉伸性能的分散性较大。而

表 6 热等静压 TiAl–4522XD 合金室温拉伸性能

Tab.6 Tensile properties of HIP TiAl–4522XD alloy

HIP temperature/℃	R_m/MPa	$R_{p0.2}$/MPa	Elongation/%
1 260	697	697	0.9
	700	699	0.8
	696	-	0.5
1 300	530	431	1.4
	562	435	1.8
	565	435	1.2
1 200+1 320	541	431	1.1
	546	428	1.2
	533	431	0.7

1 260 ℃下的组织更加细小，有利于提高室温抗拉和屈服强度。

图 18 为 1 260 ℃热等静压 TiAl-4522XD 合金试样室温拉伸断口分析结果，拉伸断口中断裂均从试样表面萌生，但从拉伸试棒侧面扫描形貌(图 18a)来看，拉伸试样表面并无明显机械加工缺陷。说明拉伸过程中裂纹萌生于试样表面的某种显微缺陷，而不是试样内部组织中的缺陷。1 260 ℃热等静压试样的微观断口类型为典型冰糖解理断口，且在裂纹源附近可观察到随机分布的二次微裂纹，这种微裂纹的产生会大大降低材料塑性。图 19 为 1 300 ℃热等静压试样的拉伸断口形貌，1 300 ℃热压下 TiAl-4522XD 合金试样不同于 1 260 ℃时的近 γ 组织，基本由片层团构成。其断口形式与 1 260 ℃时也存在较大差异，是沿层片断裂和少量二次断裂，微裂纹沿结合力较弱的片层平行方向扩展，且断口处存在大量二次台阶。如前所述，1 300 ℃热等静压试样中本身就存在沿片层方向延伸的裂纹，在拉伸过程中这些裂纹迅速扩展、相互连接，形成大量沿片层断裂断口。在沿片层裂纹遇到片层团边界时，则会转变扩展方向，在新片层团中以沿片层或穿片层的方式扩展，裂纹方向改变的位置则会形成一个台阶。由于本身就存在较多的沿片层裂纹，在拉伸过程中裂纹均来源于试样内部，如图 19a 所示。图 20 为 1 200 ℃+1 320 ℃热等

中国知网　https://www.cnki.net

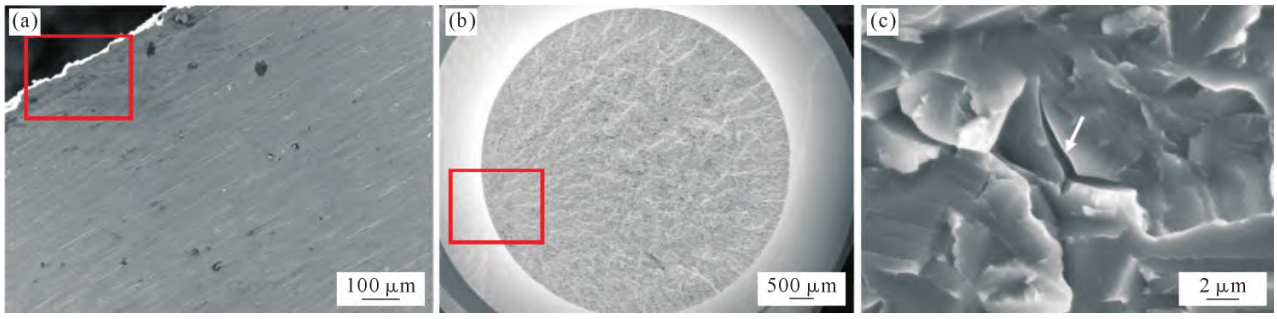

图 18 1 260 ℃热等静压 TiAl 合金拉伸试样断口形貌：(a) 断口侧面；(b) 断口正面；(c) 显微裂纹
Fig.18 Tensile fracture morphology of the 1 260 ℃ HIP TiAl-4522XD alloy: (a) side surface; (b) fracture surface; (c) microstructure of the microcrack

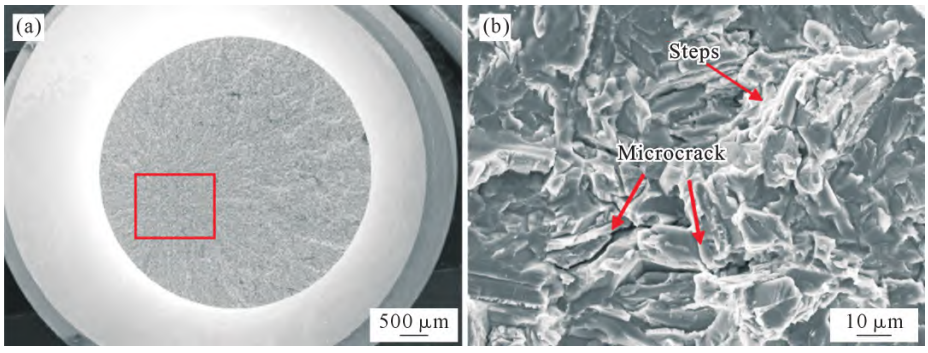

图 19 1 300 ℃热等静压 TiAl 合金拉伸试样断口形貌：(a) 断口正面；(b) 显微裂纹
Fig.19 Tensile fracture morphology of the 1 300 ℃ HIP TiAl-4522XD alloy: (a) fracture surface; (b) microstructure of the microcrack

静压试样拉伸断口组织照片，其室温拉伸断口仍是以“扇形”穿晶解理面为主，并混有沿片层断裂。由于 1 200 ℃热压时形成了大量裂纹，在 1 320 ℃热压下没有愈合，1 200 ℃+1 320 ℃热等静压试样的裂纹同样源于试样内部裂纹缺陷。如图 20b 所示在断口扫描照片中可见片层团周边存在大量微裂纹，这些微裂纹的存在加速了拉伸断裂过程。

表 7 为 1 260 ℃和 1 300 ℃热等静压试样650 ℃高温拉伸性能数据，1 260 ℃热等静压试样对应两根拉伸试棒性能较稳定，抗拉强度范围为 502~507 MPa，屈服强度波动范围也仅为±4 MPa；而 1 300 ℃高温拉伸试样中，有 1 个变形量较其他 2 根不足，同时 1 300 ℃热等静压试样的高温抗拉强度和屈服强度均显著低于 1 260 ℃下的热压试样。图 21 为不同热等静压温度下 TiAl-4522XD 合金试样 650 ℃高温拉伸断口形貌照片。1 260 ℃热等静压试样高温拉伸断口仍呈沿晶断裂的“冰糖”状解理断口，断口表面平齐，裂纹源在试样表面附近。1 300 ℃热等静压试样断口以沿晶断裂为主，单一晶粒内部为细小的沿

表 7 不同温度热等静压态 TiAl–4522XD 合金 650 ℃高温拉伸性能
Tab.7 650 ℃ tensile properties of the HIP TiAl–4522XD alloy

HIP Temperature/℃	R_m/MPa	$R_{p0.2}$/MPa	Elongation/%
1 260	507	487	0.6
	502	494	0.5
1 300	423	354	1.4
	377	-	0.7
	424	396	1.2

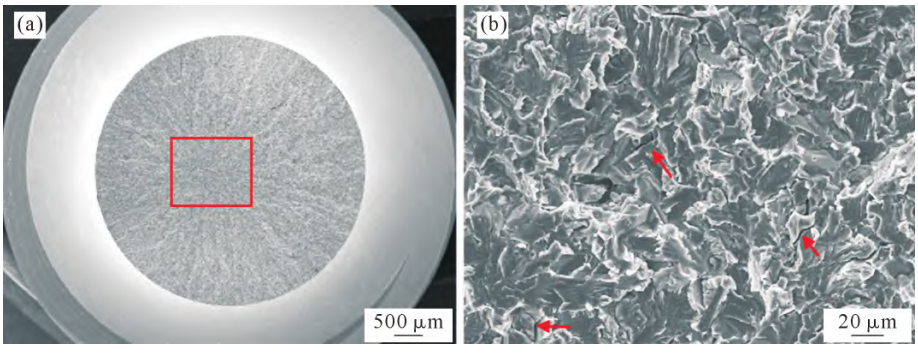

图 20 1 200+1 320 ℃热等静压 TiAl 合金拉伸试样断口形貌：(a) 断口正面；(b) 显微裂纹
Fig.20 Tensile fracture morphology of the 1 200+1 320 ℃ HIP TiAl-4522XD alloy: (a) fracture surface; (b) microstructure of the microcrack

中国知网 https://www.cnki.net

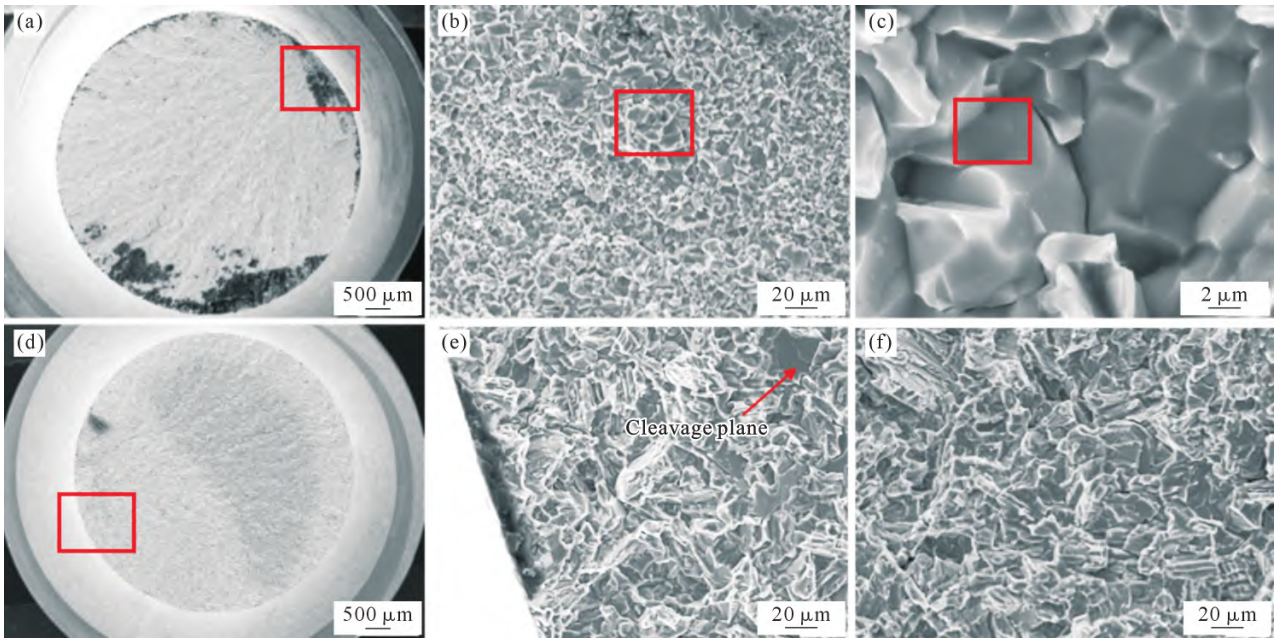

图 21　不同热等静压温度 TiAl 合金 650 ℃拉伸试样断口组织：(a~c) 1 260 ℃；(d~f) 1 300 ℃

Fig.21　650 ℃ tensile fracture of the TiAl-4522XD alloy with different HIP temperatures: (a~c) 1 260 ℃; (d~f) 1 300 ℃

片层断裂，断口表面有“二次台阶”。图 21e 和 f 分别为表 7 中抗拉强度为 377 和 424 MPa 的拉伸试样断口组织，可见两个试样中“冰糖”状解理面的数量有一定的差异，性能较低的试样中，光滑的解理断裂面比例更高，说明热等静压试样内部组织均匀性仍不足，加之 1 300 ℃热等静压试样片层间距较大，较厚的 γ 片层塑性较差、内应力较大，故易成为诱发开裂的薄弱位置。

2.2.2　粉末粒度对热等静压 TiAl-4522XD 合金组织的影响

根据前文对 TiAl-4522XD 粉末的研究结果，不同粒度 TiAl-4522XD 合金粉末表面吸附的氧含量和粉末差热有所不同，可能会对合金组织形貌、成分及相分布等因素造成影响。选用粒度范围为45~150、150~212、45~212 μm 的 3 组粉末在相同热等静压工艺下进行热等静压，分别对 3 组合金组织、物相进行检测，通过横向对比确定预合金粉末最佳粒度范围。实验设计见表 8。3 组试样真实密度计算采用阿基米德排水法，结合应用电子分析天平测量。计算结果见图 22。从计算结果可以看出，在 1 260 ℃下保温保压

表 8 不同粒度预合金粉末热等静压参数

Tab.8 HIP processing parameters for TiAl-4522XD alloys with different powder diameters

Specimen number	Particle size /μm	HIP processing parameter		
		Temperature /℃	Holding time/h	Pressure /MPa
45XD-3-1	45-150			
45XD-3-2	150-212	1 260	4	150
45XD-3-3	45-212			

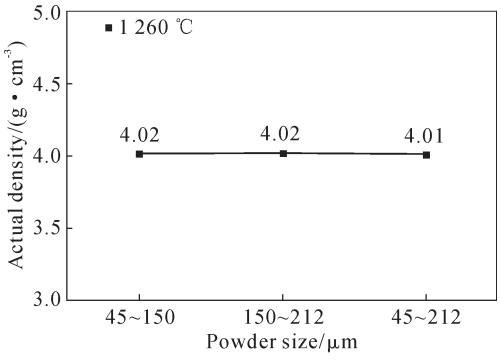

图 22　不同粒度粉末热等静压后 TiAl-4522XD 合金真实密度变化曲线

Fig.22　Density of the HIP TiAl-4522XD alloys with different powder diameters

4 h 后，3 组 TiAl-4522XD 合金试样的真实密度均为 (4.01±0.01) g/cm^3。由此可推断在满足合金致密化烧结温度、压力、时间条件下，3种粒度范围的粉末均可实现全致密化成型。

不同粒度预合金粉末热等静压试样组织形貌见图 23。低倍显微组织照片中可见 3 组热等静压试样均获得了致密组织，无明显孔洞和裂纹。高倍组织照片中可见粒度范围为 150~212 μm 和 45~212 μm 的试样中存在少量裂纹，这是因为部分大粒径的粉末在热压过程中变形量较小，导致粉末之间的缝隙未得到完全填补。此外变形量较小时，烧结驱动力不足，大粒径粉末之间即使没有缝隙，其烧结程度也相对较低，易在热应力下形成裂纹。从组织照片中还能看到，粒度范围为 45~150 μm 和 45~212 μm 的粉末热压后，部分粉末颗粒内部会优先发生片层化，粒度范围为 45~212 μm 时，颗粒内部片层团尺寸相对更

中国知网　https://www.cnki.net

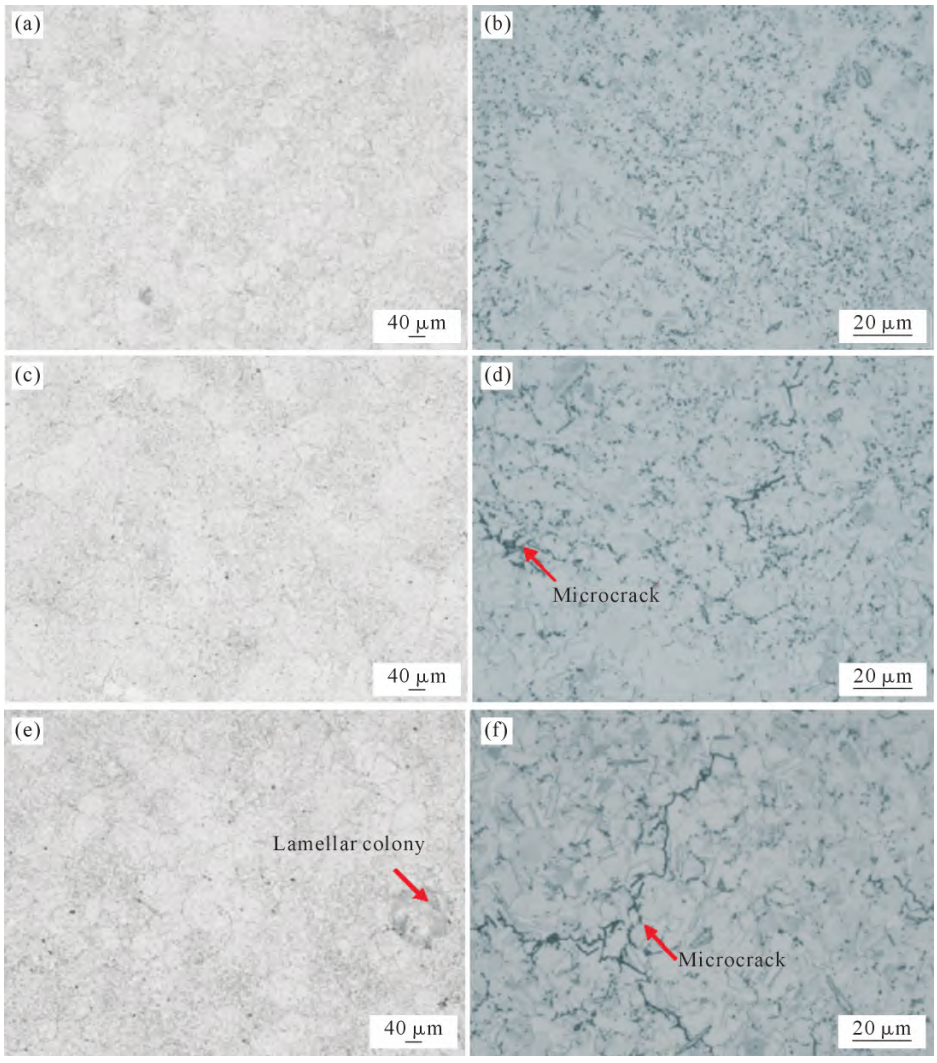

图 23 不同粒径粉末热等静压试样显微组织形貌：(a, b) 45~150 μm; (c, d) 150~212 μm; (e, f) 45~212 μm

Fig.23 Microstructures of HIP TiAl-4522XD alloys with different powder diameters: (a, b) 45~150 μm; (c, d) 150~212 μm; (e, f) 45~212 μm

大。这可能是因为粉末粒度范围较大时，热压过程中各粉末颗粒的变形量差异较大，造成不同粉末颗粒的再结晶驱动力产生差异，从而影响了合金内部组织的一致性。从以上结果可见，对 TiAl-4522XD 合金进行热等静压需要采用 45~150 μm 粒径范围的粉末，以提高组织均匀性和致密度。

2.2.3 除气真空度对热等静压 TiAl-4522XD 合金组织的影响

控制合金粉末的氧增量，提高除气真空度是保证热等静压构件致密度、内部质量和力学性能的重要因素。为了验证真空度对 TiAl-4522XD 合金组织的影响，选择 3 组试样在不同除气真空度环境中装粉除气，热等静压工艺参数均相同、包套均采用 20# 钢。试验设计见表 9。

不同除气真空度热等静压试样的真实密度测试结果如图 24 所示，组织照片如图 25 所示。除气真空度为 10^{-1} Pa 时，真实密度仅为 3.48 g/cm^3，其显微组织照片如图 25a 和 b 所示。可见合金内部仍呈粉末颗粒形态，没有烧结致密化。由于包套内残余气体过多，热等静压过程中包套无法受压变形，粉末颗粒也无法相互挤压变形，因此没有烧结驱动力，无法致密化。除气真空度 10^{-2} Pa 时，合金密度达到 4.0 g/cm^3，说明合金已经基本致密化。但从显微组织照片中可见，合金粉末仅有初步变形，原始颗粒颗粒边界依然十分明显，且合金内部存在较多微裂纹。除气真空度为 10^{-3} Pa 时，合金密度为 4.01 g/cm^3，合金粉末原始颗粒形貌基本消失，合金粉末完全实现致密化，微裂

表9 不同除气真空度下不同粒径TiAl–4522XD合金热等静压实验

Tab.9 Different vacuum degrees for HIP–processed TiAl–4522XD alloys with different powder diameters

Specimen number	Vacuum degree/Pa	HIP processing parameters		
		Temperature / ℃	Time /h	Pressure / MPa
45XD-4-1	10^{-1}			
45XD-4-2	10^{-2}	1 260	4	150
45XD-4-3	10^{-3}			

中国知网 https://www.cnki.net

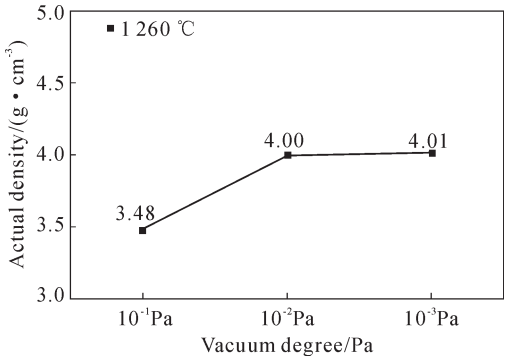

图 24 不同除气真空度下合金真实密度变化曲线

Fig.24 Variation in the density of HIP TiAl-4522XD alloy with deaeration vacuum degree

纹的数量和长度也显著减小。因此，TiAl 粉末热等静压前的除气真空度至少要达到 10^{-3} Pa。

3 结论

(1)TiAl-4522XD 合金的最佳热等静压温度是 1 260 ℃。1 200 ℃热压试样组织未实现致密化，且残留有原始颗粒边界，基体强度较低；1 300 ℃热压试样中 γ 晶粒和硼化物均快速长大，且 γ/α_2 相边界处在热应力下易开裂，使其室温和高温强度较低；而 1 260 ℃热压试样组织完全致密化，原始颗粒边界消失，室温和高温抗拉强度分别达到(698.0±2.0) MPa 和(504.5±2.5) MPa。

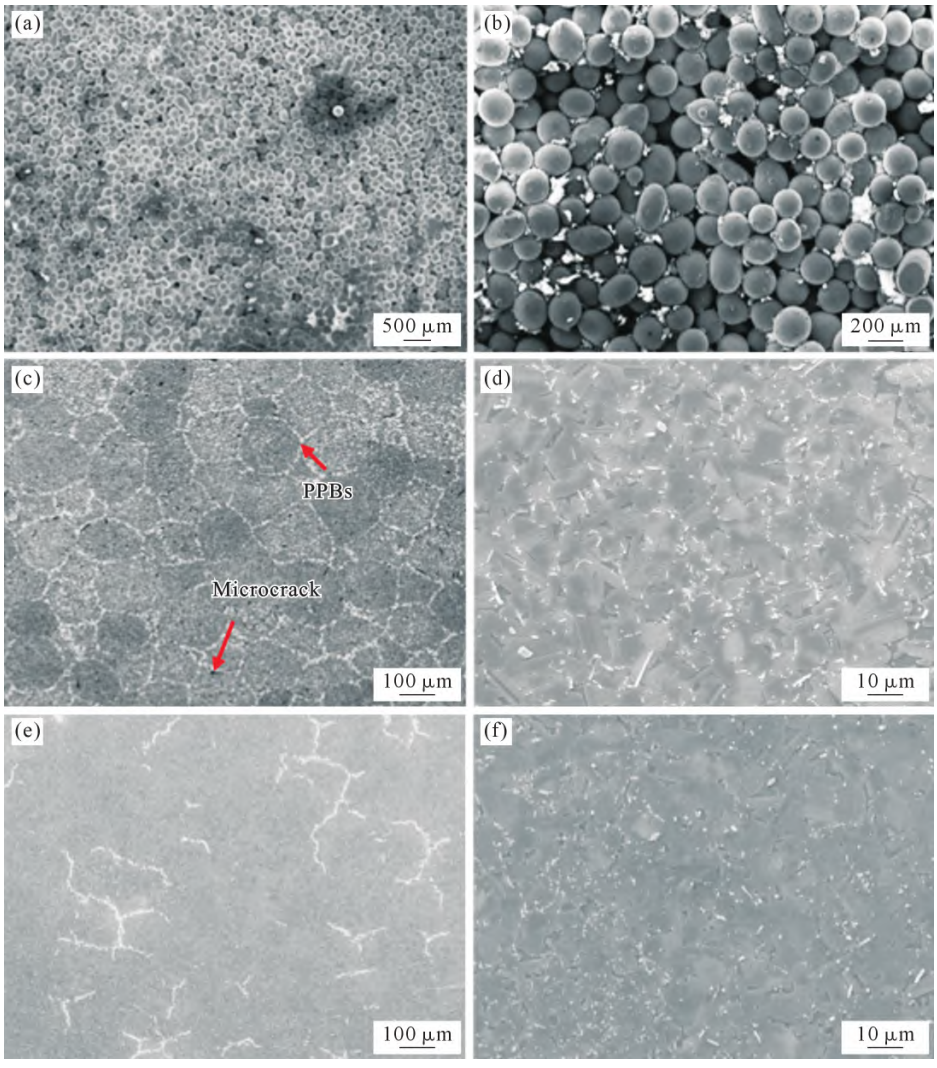

图 25 不同真空度除气热等静压后 TiAl-4522XD 合金内部组织：(a, b) 10^{-1} Pa; (c, d) 10^{-2} Pa; (e, f) 10^{-3} Pa

Fig.25 Microstructures of HIP processed TiAl-4522XD alloys with different deaeration vacuum degrees: (a, b) 10^{-1} Pa; (c, d) 10^{-2} Pa; (e, f) 10^{-3} Pa

(2)具有不同粒度范围的 TiAl-4522XD 合金粉末热压后，试样密度均能达到 TiAl-4522XD 合金理论密度。但是粒径范围为 150~212 μm和 45~212 μm 时，粉末颗粒变形量不均匀，热压试样中局部位置存在微裂纹，而粒度范围为 45~150 μm 时，热压试样组织均匀细小且无明显缺陷。

(3)TiAl-4522XD 合金热等静压前装粉除气真空度至少要达到 10^{-3} Pa，除气真空度为 10^{-1} Pa 时，TiAl-4522XD 合金无法致密化；除气真空度为 10^{-2} Pa 时，组织基本达到致密化，但残留了较多原始颗粒边界且存在微裂纹；除气真空度为 10^{-3} Pa 时，原始颗粒边界和微裂纹基本消失，组织实现完全致密化。

综合以上结果可知，由于热等静压过程中 TiAl-

中国知网 https://www.cnki.net

4522XD 合金相变过程较为复杂，使得合金组织和性能对热等静压工艺参数变化十分敏感，必须在一定的热等静压温度范围、较小的粉末粒度范围、较高的除气真空度下，才能获得理想的组织和性能。在采用热等静压工艺制备 TiAl-4522XD 合金时，必须综合考虑这些因素。最终本文获得的最佳工艺为：采用粒径范围45~150 μm 的粉末在 1 260 ℃/4 h/10^{-3} Pa 的参数下进行热等静压，此工艺制备的TiAl-4522XD 合金热等静压试样具有均匀、致密的近 γ 组织，其室温和高温抗拉强度分别为(698.0±2.0) MPa 和(504.5±2.5) MPa。

参考文献：

[1] CLEMENS H, MAYER S. Design, processing, microstructure, properties, and applications of advanced internetallic TiAl alloys [J]. Advanced Engineering Materials, 2013, 15(4): 191-215.

[2] APPEL F, CLEMENS H, FISCHER F D. Modeling concepts for intermetallic titanium aluminides[J]. Progress in Materials Science, 2016, 81: 55-124.

[3] KIM Y W, KIM S L. Advances in gammalloy materials-processes-application technology: Successes, dilemmas, and future[J]. JOM, 2018, 70: 355-360.

[4] 杨锐. 钛铝金属间化合物的进展与挑战[J]. 金属学报，2015, 51(2): 129-147.
YANG R. Advances and challenges of TiAl base alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(2): 129-147.

[5] ZHANG Y, LEE Y J, CHANG S, CHEN Y Y, BAI Y C, ZHANG J, WANG H. Microstructural modulation of TiAl alloys for controlling ultra-precision machinability[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2022, 174: 103851.

[6] XIA Z W, SHAN C W, ZHANG M H, CUI M C, LUO M. Machinability of γ-TiAl: A review[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36(7): 40-75.

[7] AGUILAR J, SCHIEVENBUSCH A, KÄTTLITZ O. Investment casting technology for production of TiAl low pressure turbine blades-Process engineering and parameter analysis[J]. Intermetallics, 2011, 19(6): 760-761.

[8] KOTHARI K, RADHAKRISHNAN R, WERELEY N M. Advances in gamma titanium aluminides and their manufacturing techniques[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2012, 55: 1-16.

[9] 陈玉勇，叶园，张宇，胡连喜，孙剑飞. 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: 4002-4012.
CHEN Y Y, YE Y, ZHANG Y, HU L X, SUN J F. Research progress on TiAl alloy prepared by powder metallurgy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52: 4002-4012.

[10] 刘玉峰，张国庆，刘娜，李周. TiAl 合金气雾化制粉及热等静压成形研究进展[J]. 精密成形工程，2022, 14(11): 47-54.
LIU Y F, ZHANG G Q, LIU N, LI Z. Research progress in gas atomization and hot isostatic pressing of TiAl alloy[J]. Journal of Net-shape Forming Engineering, 2022, 14(11): 47-54.

[11] 毛旺，李轩，韩枫，田进，李秀兰. 高品质 TiAl-Nb 基合金的粉末冶金技术研究进展[J]. 热加工工艺，2019, 48(8): 1-4, 8.
MAO W, LI X, HAN F, TIAN J, LI X L. Research progress of powder metallurgy technology of high quality TiAl-Nb based alloys[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(8): 1-4, 8.

[12] 黄伯云，韦伟峰，李松林，张立，李丽娅，刘锋，李瑞迪. 现代粉末冶金材料与技术进展[J]. 中国有色金属学报，2019, 29(9): 1917-1933.
HUANG B Y, WEI W F, LI S L, ZHANG L, LI L Y, LIU F, LI R D. Development of modern powder metallurgy materials and technology[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1917-1933.

[13] PETERS S, PEREZ M, BLACKWELL P. Integrating HIP and homogenisation heat treatment and its effect on the workability of a conventional peritectic TiAl alloy[J]. Intermetallics, 2023, 158: 107884.

[14] LI H Z, CHE Y X, LIANG X P, TAO H, ZHANG Q, CHEN F H, HAN S, LIU B. Microstructure and high-temperature mechanical properties of near net shaped Ti-45Al-7Nb-0.3W alloy by hot isostatic pressing process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(11): 3006-3015.

[15] 闫梦捷. 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 intermetallic compounds[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.

[16] 高文强，刘川，楚玉东，谭超. α 凝固 TiAl 合金显微组织细化[J]. 铸造技术，2022, 43: 1063-1067.
GAO W Q, LIU C, CHU Y D, TAN C. Microstructural refinement of α solidified TiAl alloy[J]. Foundry Technology, 2022, 43: 1063-1067.

[17] HU D. Effect of boron addition on tensile ductility in lamellar TiAl alloys[J]. Intermetallics, 2002, 10(9): 851-858.

[18] LIU B G, LIU L H, XING W D, LIU R C, YANG R, WITHEY P A, ZHU J, YU R. Structure stability and the alloying effect of TiB polymorphs in TiAl alloys[J]. Intermetallics, 2017, 90: 97-102.

[19] MPHAHLELE M R, OLEVSKY E, TSHEPHE T, OLUBAMBI P A. Nanoindentation mechanical properties on spark plasma sintered 48Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 38(2): 1191-1196.

[20] LANG Z B, ZHANG Y Z, WANG L ZHANG X H. Effects of Al_2O_3/ZrO_2 layers on carbon steel capsule during consolidation of TiAl based alloy powders by HIP[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(7): 2275-2280.

[21] 吴杰，徐磊，郭瑞鹏，卢正冠，崔玉友，杨锐. 粉末冶金 Ti-47Al-2Cr-2Nb-0.15B 合金的制备及力学性能影响因素[J]. 材料研究学报，2015, 29(2): 127-134.
WU J, XU L, GUO R P, LU Z G, CUI Y Y, YANG R. Preparation of γ-TiAl alloy from powder metallurgy route and analysis of the influence factors of mechanical properties[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2015, 29(2): 127-134.

[22] LIU Y F, LI Z, LIU N, ZHENG L, XU W Y. Effect of oxygen content of powders on previous particle boundaries in hot isostatic pressed TiAl alloy[M]//HAN Y F. High performance structural materials. CMC 2017. Singapore: Springer, 2018: 779-787.

中国知网 https://www.cnki.net

[23] HE W W, LIU Y, TANG H P, LI Y P, LIU B, LIANG X P, XI Z P. Microstructural characteristics and densification behavior of high-Nb TiAl powder produced by plasma rotating electrode process[J]. Materials & Design, 2017, 132: 275-282.

[24] NIU H Z, GAO T X, SUN Q Q, ZHANG H R, ZHANG D L, LIU G L. Prior particle boundaries and microstructural homogenization of a β-solidifying γ-TiAl alloy fabricated from prealloyed powder[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 737: 151-157.

[25] CAO R X, LIU R C, YANG C, CUI Y Y, YANG R. Structures and formation mechanism of borides with varied morphologies in cast γ-TiAl alloys[J]. Materials & Design, 2023, 232: 112122.

[26] HYMAN M E, MCCULLOUGH C, LEVI C G, MEHRABIAN R. Evolution of boride morphologies in TiAl-B alloys[J]. Metallurgical Transactions A, 1991, 22: 1647-1662.

[27] LI J, JEFFS S, WHITTAKER M, MARTIN N. Boride formation behaviour and their effect on tensile ductility in cast TiAl-based alloys[J]. Materials & Design, 2020, 195: 109064.

中国知网 https://www.cnki.net