

烧结压力、粉末形态和增强相对粉末冶金 TC4 钛合金组织和力学性能的影响

秦文栋, 邵星海, 王文焱, 谢敬佩, 李建军, 郭清远

(1. 河南科技大学材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471023; 2. 有色金属新材料与先进加工技术省部共建协同创新中心, 河南 洛阳 471023; 3. 中信重工机械股份有限公司, 河南 洛阳 471039)

摘 要: 通过调整烧结压力、TC4 粉末形态和添加 TiC 增强相, 采用真空热压烧结设备制备出不同的 TC4 钛合金, 并进行了显微组织、致密度和力学性能测试与分析。结果表明, 采用 30Mpa 烧结压力和球形 TC4 粉制备的粉末冶金 TC4 钛合金致密度可达到 98% 以上, 抗拉强度 494.6Mpa, 硬度 419HV, 明显优于无压力烧结 TC4, 略优于不规则 TC4 粉热压烧结 TC4; 球形 TC4 粉热压烧结钛合金的显微组织为 β 相和 α 相构成的网篮组织, 并分布有少量的 TiV 相; 与球形 TC4 粉热压烧结钛合金相比, 加入 4%TiC 增强相后, 晶粒得到显著细化, TiC 相分布在晶界起到第二相强化作用, 硬度显著提升, 抗拉强度略有提高。

关键词: TC4 钛合金; TiC 增强相; 热压烧结; 致密度; 显微组织

Effects of sintering pressure, powder morphology and reinforcement on microstructure and mechanical properties of powder metallurgy TC4 titanium alloy

Qin Wen-dong^{1,2}, SHAO Xing-hai^{1,2}, WANG Wen-yan^{1,2}, XIE Jing-pei^{1,2},
LI Jian-jun³, GUO Qing-yuan^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China; 2. Collaborative Innovation Center for New Materials and Advanced Processing Technology of Non-Ferrous Metals, Luoyang 471023, China; 3. Citic Heavy Industry Machinery Co., LTD., Luoyang 471039, China)

Abstract: By adjusting sintering pressure, TC4 powder morphology and adding TiC reinforcing phase, TC4 titanium alloys were prepared by vacuum hot pressing sintering equipment, and the microstructure, density and mechanical properties were tested and analyzed. The results show that the density of powder metallurgy TC4 titanium alloy prepared by 30Mpa sintering pressure and spherical TC4 powder can reach more than 98%, tensile strength of 490Mpa, hardness of 419HV, Administrator which is obviously better than non-pressure sintering TC4, slightly better than irregular hot pressing TC4 powder sintering TC4. The microstructure of spherical TC4 powder hot pressing sintered titanium alloy is a basket structure composed of β phase and α phase, and a small amount of TiV phase is distributed. Compared with spherical TC4 powder hot pressing sintered titanium alloy, the grains are refined significantly after adding 4%TiC phase, the TiC phase distribution in the grain boundary plays a second phase strengthening role, the hardness is significantly increased, and the tensile strength is slightly increased.

Keywords: TC4 titanium alloy; TiC reinforced phase; Hot press sintering; compactness; microstructure

钛及钛合金是重要的金属结构材料之一, 具有高韧性、高比强度、低密度、耐热耐蚀性好、抗疲劳性能好、生物相容性好等优点, 常应用于航空航天、海洋工程、军事武器、医疗器械等多个领域。

TC4 (Ti6Al4V) 钛合金作为 ($\alpha+\beta$) 型钛合金, 因其优异的综合性能, 是目前用途最广、应用最多、用量最大的钛合金种类。TC4 钛合金的主流生产工艺是通过真空熔炼工艺生产合金铸锭, 然后经过反

复重熔和改性锻造制备组织细小、性能优异的成品锭，再将成品锭进一步加工成形，生产多种钛合金制品。目前该生产工艺成熟稳定，流程固化繁琐，难以进一步降低生产成本。近年来粉末冶金工艺被研究用于高性能和复杂结构 TC4 工件的生产，降低生产成本，缩短生产流程，实现工业化、批量化生产，在航空航天和军工国防等领域得到广泛应用。粉末冶金工艺是通过制粉、压制、烧结等环节来生产具有一定形状和密度的产品，而且具有成分可控和近终成形的优势。然而目前粉末冶金钛合金依然存在烧结密度低和力学性能不理想的问题，无法满足作为高强结构材料对强度和塑性的要求。

制备工艺和增强相的加入对粉末冶金钛合金的组织 and 性能影响非常大。其中烧结压力在粉末冶金过程中起到促进粉末颗粒之间紧密结合、改善材料致密度和力学性能的作用，粉末原材料形态和增强相也会影响到粉末冶金钛合金的组织 and 性能，本文通过调整烧结压力、粉末形态和 TiC 增强相的加入，研究了粉末冶金 TC4 钛合金的组织 and 力学性能。

1. 实验材料及实验方法

1.1 实验材料

采用的 TC4 粉末原料属于 ($\alpha+\beta$) 型钛合金，具有良好的综合力学性能。其颗粒尺寸为 15-45 μm ，具有球形和不规则形两种形态。TC4 粉末化学成分如表 1 所示。采用的增强相为 TiC 陶瓷粉末，颗粒的尺寸为 300nm。采用滚轴式球磨仪将不同形态的 TC4 粉或加入增强相的 TC4 粉球磨至充分分散和混合，球磨工艺参数为 100r/min 低转速下球磨 24h，每球磨 1h 后静止 10min。

图 1 是 TiC 粉末、球形 TC4 粉末和不规则 TC4 粉末的 SEM 图。可以看出，未经球磨的 TiC 颗粒粒径在 0.3-3 μm 之间，如图 1 (a) 所示，部分较大的颗粒可能是团聚造成的；未经球磨的球形 TC4 颗

粒表面均较为平整、干净，如图 1 (b) 所示；经过球磨处理的 TC4 颗粒尺寸略有减少，表面变得粗糙而且附着少量的 TC4 细小碎屑，如图 1 (c) 所示，能够提升粉末的堆积密度，颗粒之间的结合性增强，烧结过程中孔隙更容易消除，致密度得到提高，从而达到提高材料致密度和性能的目的；与球形 TC4 颗粒相比，不规则 TC4 颗粒表面有较多棱角，在粉末堆积时可能出现较多的空隙，这些空隙在烧结过程若无法有效消除，可能会导致较高的孔隙率和较低的致密度，进而降低粉末冶金钛合金的力学性能，如图 1 (c) 和图 1 (d) 所示。

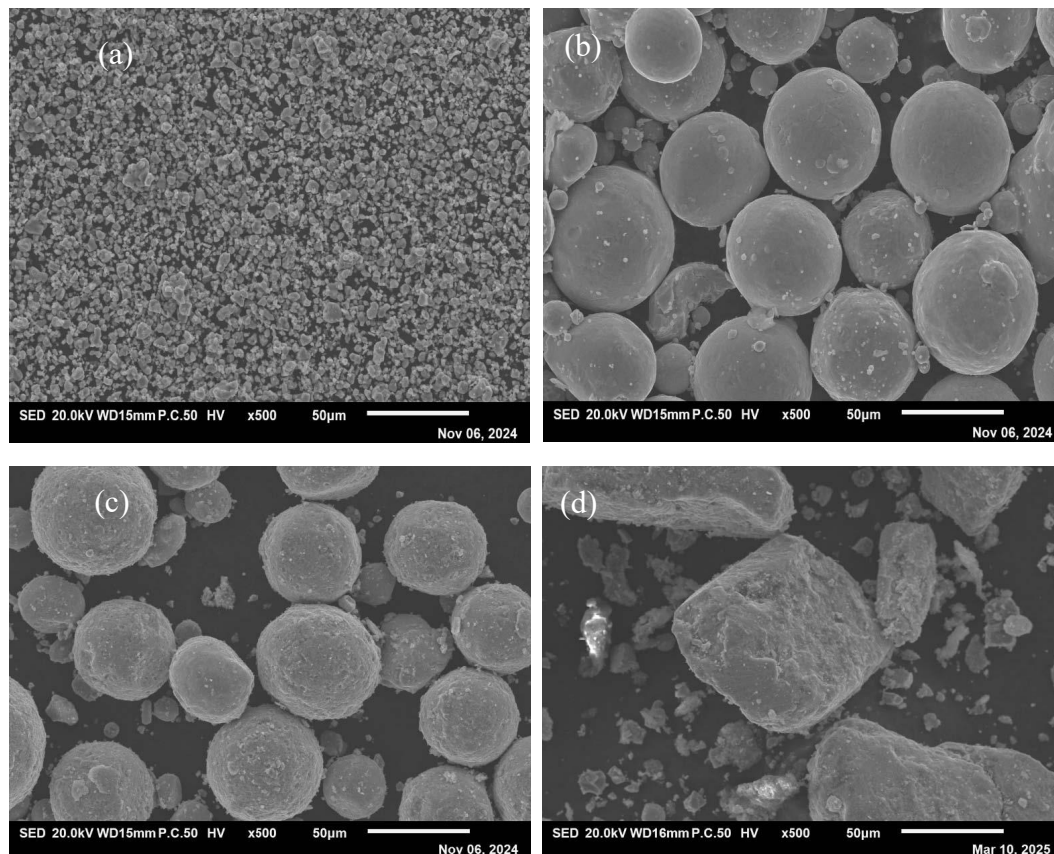
1.2 实验方法

图 2 是真空热压烧结炉和模具实物图。采用的烧结设备为上海晨华科技股份有限公司生产的 4Y-SJL01 型真空热压烧结炉，烧结模具采用高纯石墨加工制备成上下通透的圆柱体形状，内腔 ϕ 30mm，壁厚 20mm，内腔上、下配备 ϕ 30mm 的高纯石墨棒用于烧结过程的压粉，并采用 ϕ 30mm*3mm 的石墨垫片作为活块，活块与 ϕ 30mm*0.2mm 厚的石墨纸一起使用放置在粉末和石墨棒之间，用于样件与石墨棒的分离。真空烧结工艺为：抽真空至 0.1Pa 以下，按 20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 速度，首先升温到 750 $^{\circ}\text{C}$ 后保温 10min，再升温到 950 $^{\circ}\text{C}$ 后保温 10Min，最后升温到 1050 $^{\circ}\text{C}$ 后保温 1h。真空热压烧结工艺在真空烧结工艺基础上，升温到 1050 $^{\circ}\text{C}$ 后，以 2kN/min 加载速度加压至 24.7kN。烧结完成以后通过液压机将石墨棒和样件从圆柱体石墨模具中脱离出来，并去除石墨棒和石墨垫片，得到粉末冶金钛合金样品。表 2 是实验工艺设计方案，采用球形 TC4 粉+真空烧结、球形 TC4 粉+真空热压烧结、不规则 TC4 粉+真空热压烧结和球形 TC4 粉+TiC 粉+真空热压烧结四种工艺方案制备 4 种样品，分别编号 1、2、3 和 4。

表 1 TC4 粉末化学成分 (质量分数, wt%)

Tab.1 Chemical composition of TC4 powder (wt%, mass fraction)

No.	Ti	Al	V	Fe	C	N	H	O
含量 (%)	Et al.	5-7	3-5	0.02	0.05	0.02	0.001	0.4



(a) TiC 粉末 (b) 球形 TC4 粉末 (c) 球磨后球形 TC4+TiC 粉末 (d) 球磨后不规则 TC4+TiC 粉末
图 1 原材料粉末的 SEM 图

Fig.1 (a) SEM picture of TiC powder (b) SEM picture of TC4 powder
(c) Spherical TC4+TiC powder after ball milling (d) Irregular TC4+TiC powder after ball milling

1.2 实验方法

图 2 是真空热压烧结炉和模具实物图。采用的烧结设备为上海晨华科技股份有限公司生产的 4Y-SJL01 型真空热压烧结炉，烧结模具采用高纯石墨加工制备成上下通透的圆柱体形状，内腔 ϕ 30mm，壁厚 20mm，内腔上、下配备 ϕ 30mm 的高纯石墨棒用于烧结过程的压粉，并采用 ϕ 30mm*3mm 的石墨垫片作为活块，活块与 ϕ 30mm*0.2mm 厚的石墨纸一起使用放置在粉末和石墨棒之间，用于样品与石墨棒的分离。真空烧结工艺为：抽真空至 0.1Pa 以下，按 20°C/min 速度，首先升温到 750°C 后保温 10min，再升温到 950°C 后保温 10Min，最后升温到 1050°C 后保温 1h。真空热压烧结工艺在真空烧结工艺基础上，升温到 1050°C 后，以 2kN/min 加载速度加压至 24.7kN。烧结完成以后通过液压机将石墨棒和样品从圆柱体石墨模具中脱离出来，并去除石墨棒和石墨垫片，得到粉末冶金钛合金样品。表 2 是实验工艺设计方案，采用球形 TC4 粉+真空烧结、球形 TC4 粉+真空热压烧

结、不规则 TC4 粉+真空热压烧结和球形 TC4 粉+TiC 粉+真空热压烧结四种工艺方案制备 4 种样品，分别编号 1、2、3 和 4。

采用线切割方法将 4 种粉末冶金钛合金样品加工成样块和力学性能试样：①将样块依次使用 400 目、800 目和 1500 目的水砂纸磨平，并进行抛光后使用配比为 HF:HNO₃:H₂O 1:3:7 的腐蚀液进行腐蚀后制备成金相试样，在配备有能谱仪 (EDS) 的 JSM-5610LV 扫描电子显微镜 (SEM) 下进行显微组织分析和晶粒直径计算；②加工 0.2mm 厚的薄片，通过机械减薄和离子减薄制备成透射试样后，在 JEM-2100 透射电子显微镜 (TEM) 下进行 TiC 颗粒和基体组织分析。③将金相试样抛光后在维氏硬度计下测量硬度，每种材料测 10 个点后取平均值，通过使用阿基米德排水法算出不同试样的致密度；④加工出 ϕ 5mm*5mm 的圆柱试样在霍普金森压杆装置上进行动态载荷测试 (应变速率)，取微小拉伸试样在万能试验机上进行抗拉强度测试。



图 2 真空热压烧结炉和模具实物图 (a) 真空热压烧结炉实物图 (b) 模具实物图

Fig.2 Vacuum hot pressing sintering furnace and mold physical drawings

(a) Physical picture of vacuum hot pressing sintering furnace (b) mold physical drawings

表 2 实验工艺设计方案

Table 2 Experimental process design table

编号	烧结工艺	材料	压力(MPa)	温度 (°C)	升温时间 (°C/min)	增强相
1	球形 TC4 粉+ 真空烧结	球形 TC4 粉	0	1050	20	无
2	球形 TC4 粉+ 真空热压烧结	球形 TC4 粉	35	1050	20	无
3	不规则 TC4 粉 +真空热压烧结	不规则 TC4 粉	35	1050	20	无
4	球形 TC4 粉 +TiC 粉+真空 热压烧结	球形 TC4 粉 +TiC	35	1050	20	4%TiC

2 实验结果与分析

2.1 显微组织和致密度

图 3 为四种材料的 SEM 图。可以看出, 烧结出来的试样组织都是 α 相和 β 相且组织形状大多都是篮网状的且规则 TC4 粉末烧结出来的试样, 基体组织要比不规则粉末烧结出来的要小且采用球形 TC4 粉+真空烧结制备的样品内部存在较多孔隙, 如图 3 (a) 所示, 经过计算, 样品烧结后的体积为烧结前的 87%; 由图 3 (b)、图 3 (c) 和图 3 (d) 可以看出, 采用真空热压烧结工艺和不同粉末制备的钛合金样品基本为密实状态, 烧结后的体积均为烧结前的 65%左右, 密实程度显著提升, 而且组织为典型的 α -Ti+ β -Ti 双相组织。其中 α -Ti 的占比远大于 β -Ti 的占比, 具有较高的强度, 但是韧性相对较

低。通过测量, 热压烧结的球形 TC4、不规则 TC4 和添加 TiC 三种材料平均直径分别为 55 μ m、60 μ m 和 25 μ m, 球形 TC4 烧结材料的晶粒比不规则 TC4 烧结材料的略小, 加入 TiC 颗粒后组织得到显著细化。

热压烧结能够得到高致密度的材料, 通常具有更好的力学性能和稳定性。烧结过程施加的压力能够让粉末颗粒之间的接触更加紧密, 晶粒生长会受到限制, 晶粒尺寸趋向均匀和较小, 使得晶粒的长大受到压实和塑性变形的制约, 从而抑制了过度的晶粒生长。TiC 颗粒的增加可诱发局部应力集中, 促进动态再结晶, 再结晶的过程中, TiC 颗粒阻碍亚晶界的迁移, 形成更细小的等轴晶粒。能够进一步抑制晶粒的长大, 得到细晶组织, 可以提高材料的强度和韧性, 增强材料的抗疲劳性, 有效的避免由于粗大晶粒带来的性能退化。

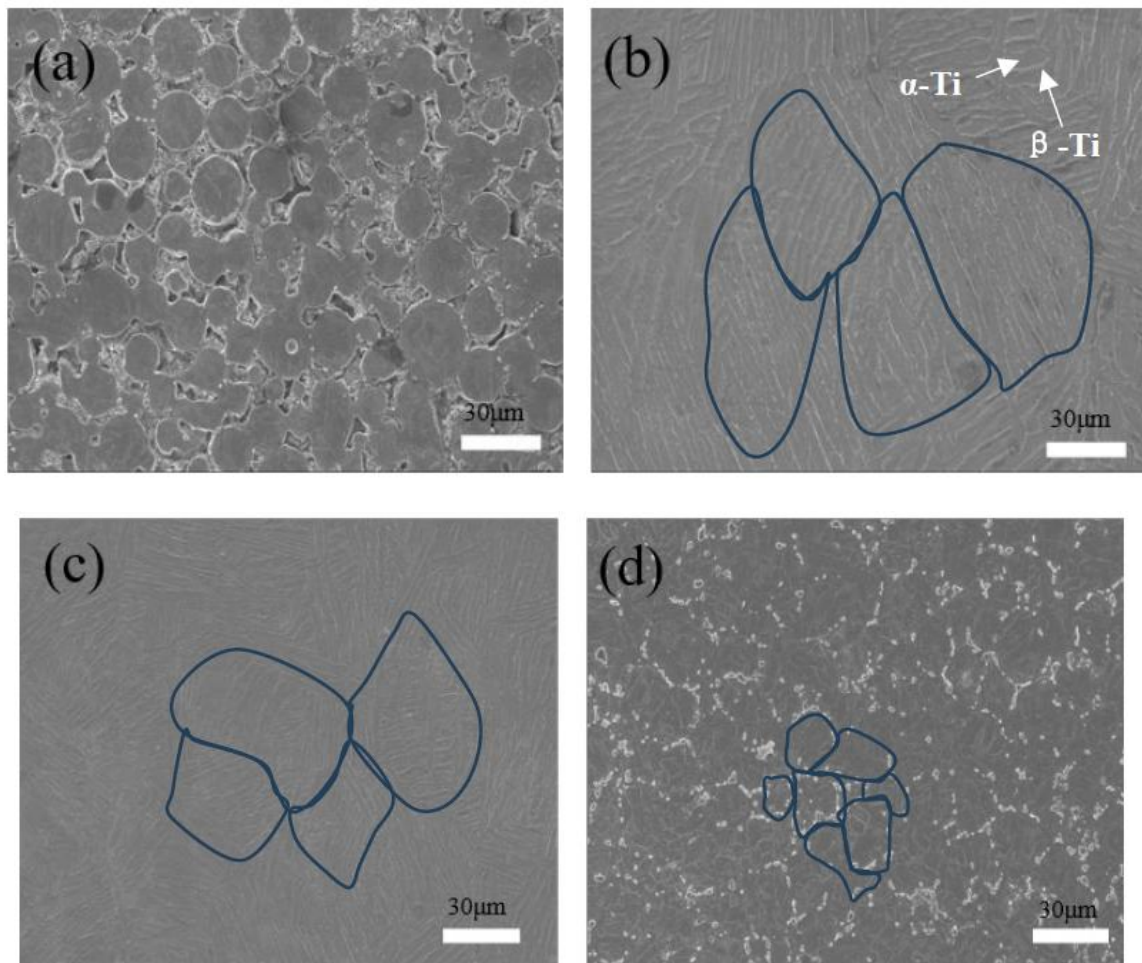


图 3 四种材料的 SEM 图 (a) 球形 TC4 粉+真空烧结 (b) 不规则 TC4 粉+真空热压烧结
(c) 真空热压烧结+球型 TC4 粉 (d) 真空热压烧结+球形 TC4 粉+TiC 粉

Fig.3 (a) SEM image of vacuum sintering (b) Irregular TC4 powder + vacuum hot pressing sintering
(c) Vacuum hot press sintering + spherical TC4 powder (d) SEM image of TiC particle enhanced phase

图 4 是四种材料的致密度计算结果。可以看出真空烧结的材料致密度仅为 73%，真空热压烧结的三种材料致密度均能达到 97.9% 以上，其中加入 TiC 颗粒的致密度为 98.3%，略高于不加入 TiC 颗粒的两种材料。可过与 SEM 分析结果和体积变化计算结果一致。烧结压力对致密度的影响最大，远高于原材料形态和加入种类的影响。烧结过程施加的压力能够使原子之间的扩散更加充分，粉末颗粒结合的更紧实，减少了大量的孔隙，最终得到致密的固体结构。而进一步加入 TiC 颗粒后，TC4 在烧结过程中的晶粒尺寸变得细小，使材料结合程度进一步提升。真空烧结材料的致密度很低，会导致材料的力学性能有很大的降低，而进行加压以及加入 TiC 颗粒增强相的工艺后对其力学性能的影响也有很大的影响。具体来说，烧结压力对钛合金的性能有以下几个方面的影响：烧结压力直接影响钛合金粉末的致密度。高致密度通常意味着更好的力学性能，如强度、硬度等。提高烧结压力通常会导致钛合金

的强度、硬度和耐磨性等性能的改善。烧结压力还会影响钛合金的晶粒生长。在适当的烧结压力下，钛合金的晶粒能够得到更好的控制，避免晶粒过大或过小。烧结过程中，粉末颗粒的扩散和融合是一个重要的过程，烧结压力会促进扩散过程的进行。较高的烧结压力能够加速粉末颗粒的相互作用，使得钛合金的微观结构更加均匀，有助于提高最终材料的性能。烧结压力还可能影响钛合金的热处理效果。在较高的烧结压力下，材料的初始状态更加致密，有助于后续的热处理过程（如时效、退火等）更好地发挥作用，进一步提升钛合金的综合性能。烧结压力过低会导致材料的致密度不够，力学性能较差；而过高的烧结压力可能会引起过度的晶粒长大或烧结时的缺陷，甚至可能导致材料的变形或开裂。因此，在钛合金的烧结过程中，需要根据具体的粉末种类、烧结温度和工艺要求来确定合适的烧结压力，因此选择合理的烧结压力能够有效提升钛合金的综合性能。致密度通常意味着更好的力学性

能，如强度、硬度等。

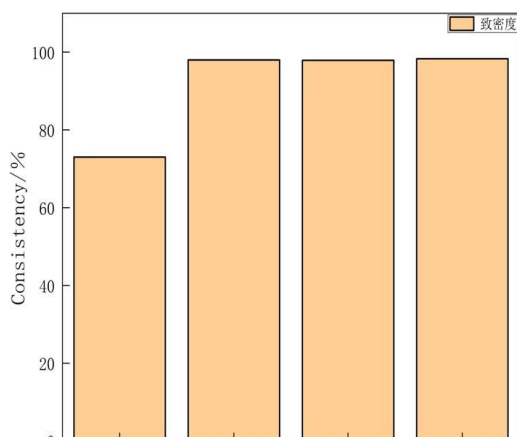


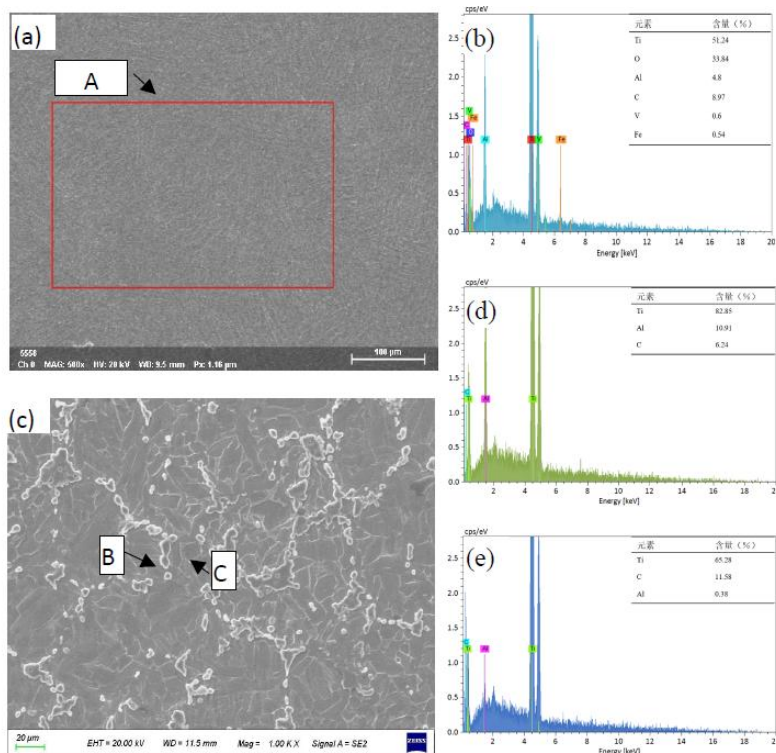
图 4 四种材料的致密度计算结果

Fig4. Results of density calculation of four kinds of materials

提高烧结压力通常会导致钛合金的强度、硬度和耐磨性等性能的改善。烧结压力还会影响钛合金的晶粒生长。在适当的烧结压力下，钛合金的晶粒能够得到更好的控制，避免晶粒过大或过小。烧结过程中，粉末颗粒的扩散和融合是一个重要的过程，烧结压力会促进扩散过程的进行。较高的烧结压力能够加速粉末颗粒的相互作用，使得钛合金的微观结构更加均匀，有助于提高最终材料的性能。烧结

压力还可能影响钛合金的热处理效果。在较高的烧结压力下，材料的初始状态更加致密，有助于后续的热处理过程（如时效、退火等）更好地发挥作用，进一步提升钛合金的综合性能。烧结压力过低会导致材料的致密度不够，力学性能较差；而过高的烧结压力可能会引起过度的晶粒长大或烧结时的缺陷，甚至可能导致材料的变形或开裂。因此，在钛合金的烧结过程中，需要根据具体的粉末种类、烧结温度和工艺要求来确定合适的烧结压力，因此选择合理的烧结压力能够有效提升钛合金的综合性能。

为了进一步分析 TiC 颗粒和基体组织，对球形 TC4 粉+真空热压烧结和球形 TC4 粉+TiC 粉+真空热压烧结试样进行 SEM 和 EDS 分析，结果如图 5 所示。结果表明，TC4 组织均匀，由 Ti、Al 和 V 等合金元素组成，大部分为细小片状和针状组织，可能是 α -Ti 相，未发现析出的第二相，如图 5 (a) 和图 5 (b) 所示；加入 TiC 颗粒以后，在晶界处分布有大量的第二相颗粒，通过能谱分析，基体主要由 Ti 和 Al 合金元素组成，第二相主要有 Ti 和 C 元素组成，应当为所添加的 TiC 颗粒，如图 5 (c)、图 5 (d) 和图 5 (e) 所示。



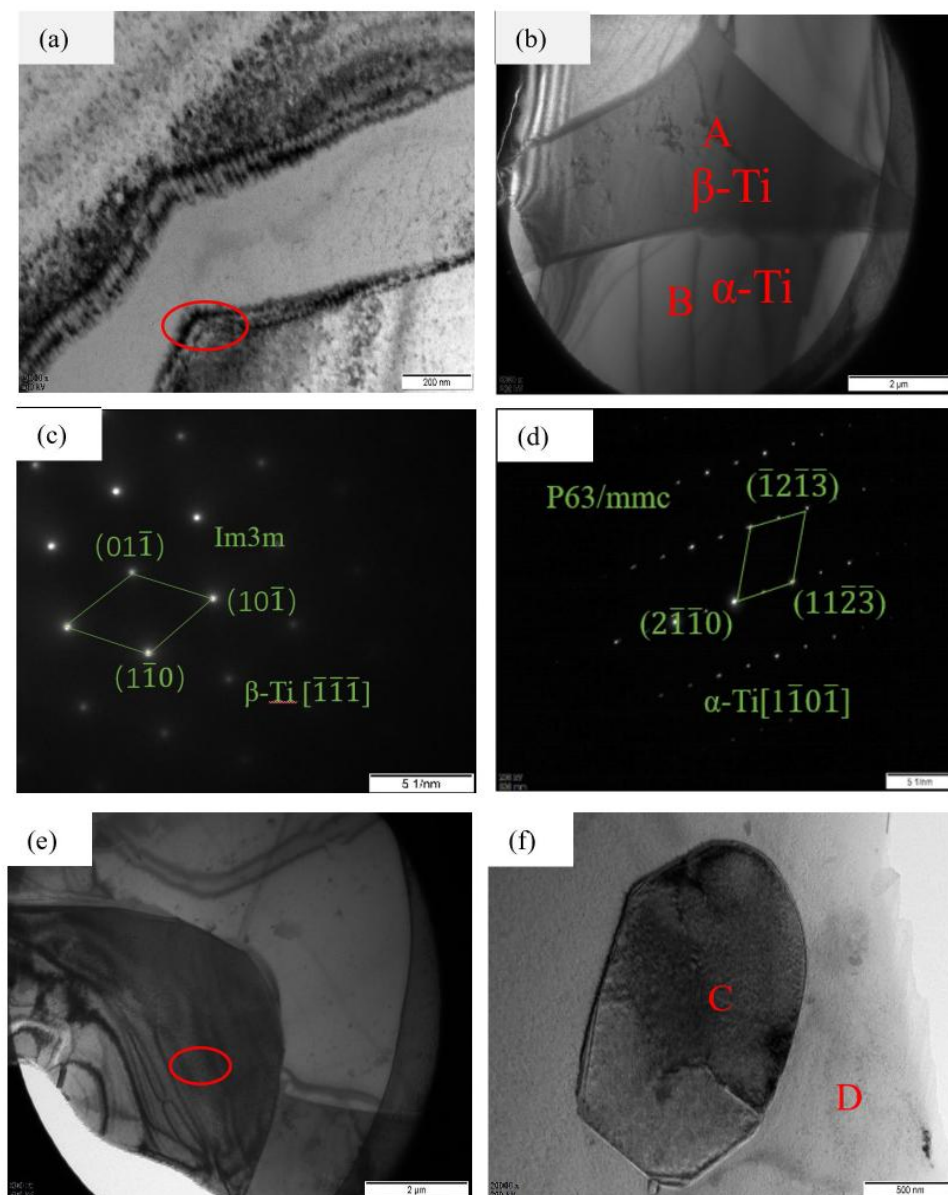
(a) 球形 TC4 粉+真空热压烧结 SEM 图；(b) 选区 A 的 EDS 分析结果；(c) 球形 TC4 粉 TiC 粉+真空热压烧结 SEM 图；(d) 点 B 的 EDS 分析结果；(e) 点 C 的 EDS 分析结果

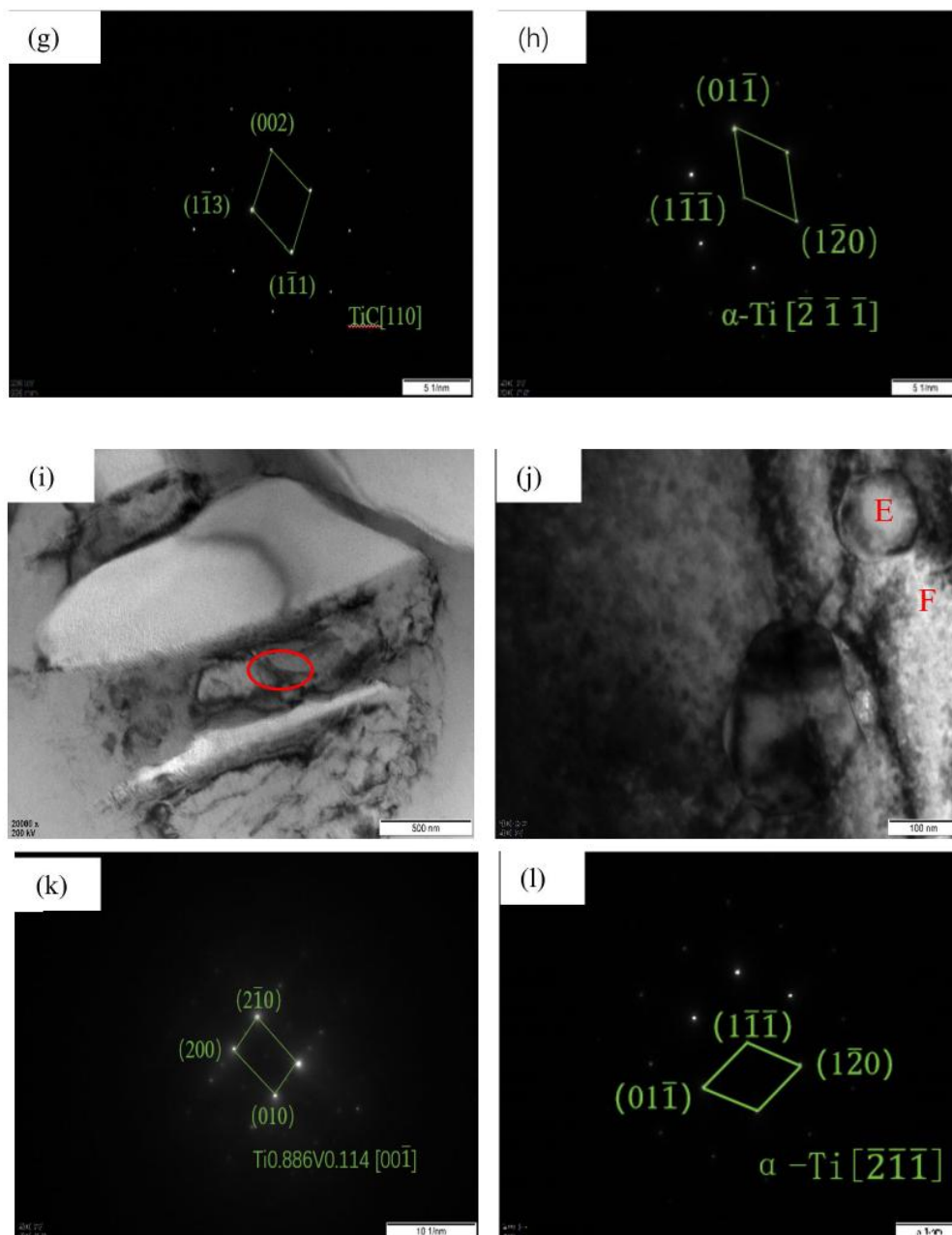
图 5 SEM 和 EDS 分析

Fig.5 SEM image of spherical TC4 powder + vacuum hot pressing sintering

为了进一步观察加入基体组织和增强相，对球形 TC4 粉 TiC 粉+真空热压烧结试样进行了 TEM 表征和电子衍射斑点 (SAED) 分析，结果如图 6 所示。图 6 (a) (b) (e) (f) (i) 和 (j) 为材料中基体、大量不规则的第二相和少量规则的第二相的 TEM 明场像，其他为选区 A、B、C、D、E 和 F 的电子衍射斑点图。图 (b) 为 (a) 选区的高倍图片，通过通过进行衍射花样的标定可以分析出，粉末冶金钛合金的基体经过标定主要为 P63/mmc 密排 6 方结构的 α -Ti 相，并分布有少量的 Im3m 体心立方结构的 β -Ti 相，晶带轴分别为 [111] 和 [1101]；在基体中除了有 α 相和 β 相外还发现有析出有纳米级的小颗粒对其进行标定和分析如图 (e) (f) 所示，大量不规则的第二相经过衍射花样标定分析，是 Fm-3m 面心立方结构的 TiC 相，尺寸在 $1\mu\text{m}$ 以下，

晶带轴为 [110]，分布在 α -Ti 基体中是添加的 TiC 颗粒的增强相；在图 (i) 中发现晶界处有不同尺寸纳米，判断可能为添加的 TiC 颗粒，然后对其高倍数图片 (j) 中的颗粒进行衍射花样标定分析，结果是体心立方结构的 Ti0.886V0.114，晶带轴为 [001]，分布在 α -Ti 基体中经过分析出现 TV 相颗粒的产生的原因可能为 V 元素局部偏析造成的。可以看出，合金中除了 α -Ti 和 β -Ti 相以外，V 元素以纳米级 Ti0.886V0.114 第二相颗粒的形式起到析出强化的作用，可有效钉扎位错，通过阻碍位错滑移提升材料的强度，同时保持一定塑性；TiC 颗粒作为外加的增强相颗粒，大量分散在在 α -Ti 基体的晶界位置，通过钉扎晶界和抑制形核起到细化晶粒和弥散强化的作用。





(a) (b) (e) (f) (i) (j) : 基体、不规则颗粒和规则颗粒的 TEM 明场像; (c) (d) (g) (h)
(k) (l) :点 A、B、C、D、E、F 对应的衍射花样图

图 6 TEM 表征和电子衍射斑点 (SAED) 分析

Fig.6 (a) (b) (e) (f) (i) (j) It is a TEM image of bright field containing 4% TiC particles (c) (d) (g) (h) (k) (l) Is the diffraction pattern corresponding to A, B, C, D, E and F

2.2 力学性能分析

通过对四个试样的进行显微硬度和抗拉强度测试, 结果如图 7 所示。结果表明, 真空烧结试样的硬度仅为 393.7HV, 抗拉强度仅为 346.2MPa, 远低于真空热压烧结试样; 在热压烧结工艺的三种材料中, 球形 TC4 粉试样的硬度为 419.4HV, 抗拉强度仅为 494.6MPa, 比不规则 TC4 粉试样略有提高, 在球形 TC4 粉中加入 4% 的 TiC 颗粒后, 硬度提高

到 442.7HV, 可提高 5.6%。抗拉强度仅为 553.9MPa, 可提高 11.2%。

对硬度差异的原因进行分析: 真空烧结的试样主要依靠重力作用和烧结过程实现粉末密实化, 粉末之间结合的不够密实, 这会导致材料的硬度和强度很差, 在烧结过程施加足够的压力能够加速颗粒之间的扩散作用和结合过程, 得到更加均匀和密实的组织, 使微观组织和相分布更加一致, 可显著提

升材料硬度和强度；采用不规则的 TC4 粉末进行粉末冶金钛合金制备，由于颗粒形态差异大，导致材料致密度和强度略有下降，使用球形 TC4 粉末能够得到更高密实度的材料，因此硬度和强度会有所增

加；加入 TiC 颗粒后，细小的硬质相颗粒分布在晶界处，通过细晶强化和弥散强化作用，能够显著提升材料的硬度和强度。

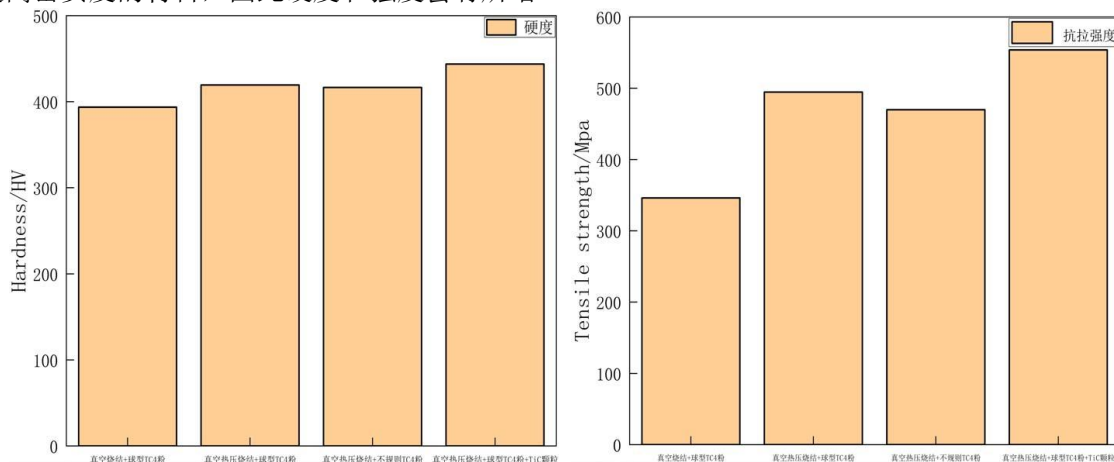


图 7 四个试样的显微硬度和抗拉强度测试结果

(a)四个试样的显微硬度测试结果 (b)四个试样大抗拉强度测试结果

Fig.7 Microhardness and tensile strength test results of four specimens

Microhardness test results of four specimens (b) High tensile strength test results of four samples

对热压烧结试样进行霍普金森压杆动态冲击实验，通过图 8 和图 9 可以看出当受到动态冲击时，TiC 的加入可能缩短能量吸收峰值时间，不规则 TC4 粉的吸能能力要小于规则 TC4 以及加入 TiC 颗粒的吸能能力，这说明加入 TiC 颗粒通过钉扎效应延缓裂纹扩展，间接提升吸能，材料的抗冲击性能

更好。在图 9 中，时间正向时，加入 TiC 颗粒增强相的冲击力要远大于其他两种，这说明加入 TiC 颗粒材料晶粒细化后，位错运动受阻，动态强度提升，冲击力峰值增大。添加硬质颗粒可提高材料的瞬时承载能力，冲击力显著增加，抗变形能力增强。

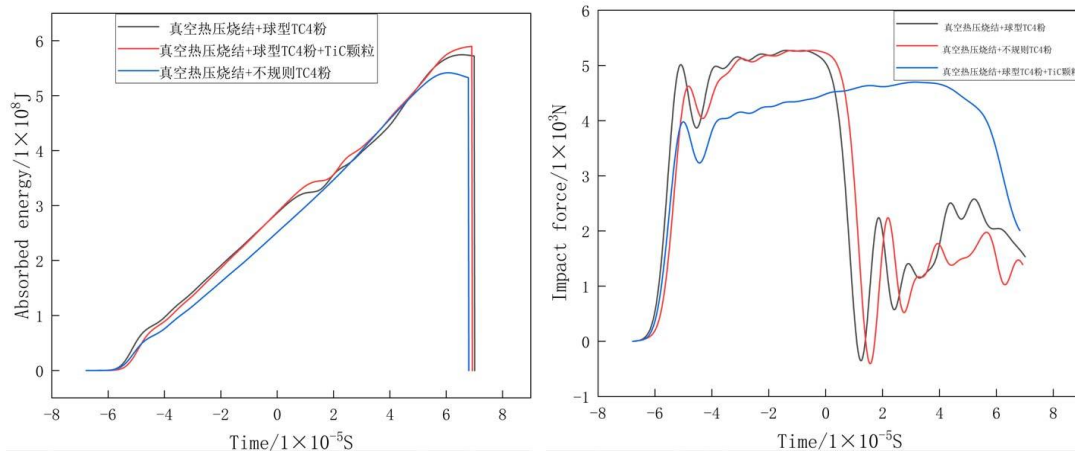


图 8 单位体积吸收能-时间曲线 图 9 冲击力-时间曲线

Fig.8 Absorbed energy per unit volume - time curve Fig.9 Impact force - time curve

3 结论

(1) 在相同温度下，加入 TiC 颗粒增强相的热压烧结的试样优于热压烧结的 TC4 规则试样和热压烧结的 TC4 不规则试样以及无压烧结的试样，致密度更高，晶粒更均匀细小。这是因为较高的烧结压力和 TiC 颗粒的加入起到的细晶强化的作用。而细小均匀的晶粒能提高材料的强度、韧性和抗疲劳性，有效避免因粗大晶粒导致的性能退化。(2) 加入

TiC 颗粒增强相的热压烧结的试样优于热压烧结的 TC4 规则试样和热压烧结的 TC4 不规则试样以及无压烧结的试样，其综合力学性能也更好。加入 TiC 颗粒的热压烧结则能加速颗粒相互作用，使组织更均匀，提升材料性能。此外，在热压烧结中，规则 TC4 粉末烧结的试样硬度与不规则 TC4 粉末烧结的试样的致密度基本相同，粉末颗粒状态对于致密度的影响较小。(3) 烧结工艺为真空热压烧结+球形 TC4 粉+TiC 颗粒的烧结试样的硬度最高，可

达到 443.7HV,且该材料的抗拉强度、抗冲击性能以及抗变形能力都是四组试样中最好的。这说明在烧结过程中加入 TiC 颗粒作为增强相能够提高材料的综合力学性能。

参考文献

- [1] 刘荣娥,胡树山,齐文港.Ti6Al4V 钛合金粉末烧结体緻粗过程致密化规律研究[J]. 热加工工艺,2019,48(15):113-117.
- [2] 周洋.粉末冶金 TiB 增强钛基复合材料制备技术研究[D]. 北京科技大学,2023.
- [3] 孙志雨,李建崇,朱郎平,等.烧结温度对 TC4 合金显微组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2017,37(04):362-366.
- [4] 杨军,张家敏,马文瑾,等.烧结温度对 TC4 合金的微观结构和力学性能的影响[J]. 材料研究学报,2019,33(05):338-344.
- [5] 窦健敏.高密度烧结钛合金的研制[J]. 稀有金属,1991,(06):472.
- [6] 高营.粉末冶金 TA15 钛合金高温 β 热轧板材组织性能研究[D].北京科技大学,2024.
- [7] 骆姝伊.Ti-Zr-Ni 基合金 SPS 烧结制备及热变形行为研究[D].哈尔滨工业大学,2023.
- [8] 佟健博,潘宇,张文强,等.粉末冶金 TC4-PCS 复合材料的热变形行为[J].材料工程,2024,52(10):90-96.
- [9] 姚远.粉末冶金法制备 TC4/AZ31 镁基复合材料及其性能研究[D].南华大学,2023.
- [10] 李少龙,李树丰,张鑫,等.粉末冶金 TC4-B4C 原位反应制备 TiC+TiB 增强 TC4 基复合材料的显微组织和力学性能[J].中国有色金属学报,2023,33(06):1769-1783.
- [11] 王帅.粉末冶金层状 TiBw/TC4 复合材料组织与力学性能研究[D].哈尔滨工业大学,2017.
- [12] 张辉,赵亚斌,潘爱琼.粉末冶金法制备细晶 TC4 钛合金的微观组织与力学性能[J]. 粉末冶金工业, 2021, 31(05):66-70.DOI:10.13228/j.boyuan.issn1006-6543.20210027.
- [13] 孟渤.TC4-6 wt.%Cu 热压烧结组织及性能研究[D].南京理工大学,2020.DOI:10.27241/d.cnki.gnjgu.2020.002035.
- [14] 魏小华,王晔,李学问,等.热压烧结温度对固相再生 TC4 钛合金微观组织及硬度影响[J].特种铸造及有色合金, 2020,40(05):470-473.DOI:10.15980/j.tzzz.2020.05.002.
- [15] 孙志雨,李建崇,朱郎平,等.烧结温度对 TC4 合金显微组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2017,37(04):362-366.DOI:10.15980/j.tzzz.2017.04.004.
- [16] 杨军,张家敏,马文瑾,等.烧结温度对 TC4 合金的微观结构和力学性能的影响[J]. 材料研究学报,2019,33(05):338-344.
- [17] 罗军明,吴小红,徐吉林.TiC 含量对微波烧结 TiC/TC4 复合材料组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2017,46(11):3416-3421.
- [18] Hu Z Y, Peng H C, Zhang Z H, et al. Influence of the sintering temperature on the microstructure, mechanical properties and densification characteristics of (TiB+TiC)/TC4 composite[J]. Materials Research Express, 2021, 8(12): 126517.
- [19] Tian Y Q, Hou H L, Ren X P. Structure and Properties of TC4 Alloy by Die Forming and Sintering Utilizing Hydrogenated Powder[J]. Advanced Materials Research, 2011, 291: 629-634.
- [20] Jun Y, Jiamin Z, Wenjin M A, et al. Effect of Sintering Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of TC4 Alloy[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2019, 33(5): 338-344.
- [21] Feng P, Wang B, Yang C, et al. The formability, microstructure, and mechanical properties of powder-sintered TC4 alloy hollow shafts formed by cross-wedge rolling[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31(11): 8989-9000.
- [22] Wang Q, Zhang Z H, Su T J, et al. Effect of Sintering Temperature on Room Temperature Microstructure of TiB Reinforced Titanium Matrix Composite[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2023, 2460(1): 012073. [22] Duan H Q, Zhang H M, Cheng X W, et al. Enhanced strength and toughness in TC4-(GNPs/TC4) composites via heterogeneous multi-scale lamination design[J]. Materials Characterization, 2024, 216: 114184.
- [23] Liu R, Wang B, Hu S, et al. Unified modeling of the microstructure and densification of TC4 powder titanium alloy during hot deformation[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 4904-4918.
- [24] Peng H, Li X, Xu C, et al. Effect of grain size on high-temperature stress relaxation behavior of fine-grained TC4 titanium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(3): 668-677.
- [25] Peng H, Li X, Xu C, et al. Effect of grain size on high-temperature stress relaxation behavior of fine-grained TC4 titanium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(3): 668-677.
- [26] Chen Y, Yao Y, Han S, et al. Study on microstructure and



- mechanical properties of TC4/AZ31 magnesium matrix nanocomposites[J]. *Materials*, 2023, 16(3): 1139.
- [27] TIAN Y, HOU H, REN X. Structure and Properties of Sintering Body by Hot Isostatic Pressing Utilizing TC4 Hydrogenated Powder[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2013, 33(3): 6-11.
- [28] Li W, Ji W, Zhu Q, et al. Heterogeneous material joining of sapphire and TC4 alloy with a functionally graded interface[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2023, 20(2): 1028-1036.
- [29] Hu Z Y, Cheng X W, Li S L, et al. Investigation on the microstructure, room and high temperature mechanical behaviors and strengthening mechanisms of the (TiB+TiC)/TC4 composites[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 726: 240-253.