

Ti(C_{0.5}N_{0.5}) 颗粒增强钛基复合材料显微组织和力学性能的研究

韩 威^{1,2,3}, 姜中涛^{2,3*}, 杨 鑫^{1,2,3}, 敬小龙^{2,3}

(1. 成都大学机械工程学院, 四川 成都 610100; 2. 重庆文理学院材料科学与工程学院, 重庆 402160; 3. 材料表界面科学重庆市重点实验室, 重庆 402160)

摘 要:以纯 Ti 粉、Ti(C_{0.5}N_{0.5}) 颗粒为原料, 采用粉末冶金工艺, 制备了 Ti(C_{0.5}N_{0.5}) 颗粒增强钛基复合材料, 研究了 Ti(C_{0.5}N_{0.5}) 含量对钛基复合材料组织和力学性能的影响。结果表明: Ti(C_{0.5}N_{0.5}) 颗粒的添加, 显著细化了钛基体的晶粒, 晶粒形貌由粗大的柱状晶转变为细小的等轴晶; 随着 Ti(C_{0.5}N_{0.5}) 含量的增加, 钛基复合材料的孔隙明显减少, 致密度提高, 钛基复合材料的硬度和屈服强度逐渐增加, 但压缩应变逐渐减小。

关键词:钛基复合材料; Ti(C_{0.5}N_{0.5}) 颗粒; 粉末冶金; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TF823, TG146.2

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)03-0059-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.03.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Research on microstructure and mechanical properties of Ti(C_{0.5}N_{0.5}) particle reinforced Ti matrix composites

Han Wei^{1,2,3}, Jiang Zhongtao^{2,3*}, Yang Xin^{1,2,3}, Jing Xiaolong^{2,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Chengdu University, Chengdu 610100, Sichuan, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China; 3. Chongqing Key Laboratory of Materials Surface and Interface Science, Chongqing 402160, China)

Abstract: Using pure Ti powder and Ti(C_{0.5}N_{0.5}) particles as raw materials, Ti(C_{0.5}N_{0.5}) particle reinforced Ti matrix composites were prepared by powder metallurgy process. The effects of Ti(C_{0.5}N_{0.5}) content on the microstructure and mechanical properties of titanium matrix composites were studied. The results show that the addition of Ti(C_{0.5}N_{0.5}) particles significantly refines the grain size of Ti matrix, and the grain morphology changes from coarse columnar grain to fine equiaxed grain. With the increase of Ti(C_{0.5}N_{0.5}) content, the porosity of Ti matrix composites decreases obviously, the density increases, and the hardness and yield strength of Ti matrix composites increase gradually, but the compressive strain decreases gradually.

Key words: titanium matrix composites, Ti(C_{0.5}N_{0.5}) particles, powder metallurgy process, microstructure, mechanical properties

0 引言

钛合金具有密度低、比强度高、热稳定性优异、

耐腐蚀性优异、生物毒性低、生物相容性好等特点, 已成为当今社会一种极其重要的新型结构材料, 被广泛应用于航空航天、国防工业、生物医学、化学

收稿日期: 2022-01-05

基金项目: 重庆市教育委员会科技项目 (No.KJQN202001306)。

作者简介: 韩威 (1995—), 男, 汉族, 四川眉山人, 硕士研究生, 研究方向: 钛基复合材料, E-mail: 3233002784@qq.com;

*通讯作者: 姜中涛, 男, 汉族, 副教授, 研究方向: 金属基复合材料, E-mail: jiangtao6364@163.com。

工业、船舶汽车等领域^[1-5]。但是,低硬度和较差的摩擦性能限制了钛合金在严重磨损和摩擦条件下的应用,抗氧化能力不足限制了钛合金在高温领域的应用^[6-7]。为了适应在各种复杂环境下的服役工况,要求钛基复合材料要轻质、疲劳性能好、高韧、高刚度^[8]。颗粒增强钛基复合材料(PTMCs)由于其优越的刚度、韧性和优异的比强度,受到了国内外的广泛关注并被研究^[9]。

在钛基复合材料中加入陶瓷增强体是显著提高钛基复合材料强度、弹性模量和抗蠕变性能的有效手段^[10]。与 Ti 合金相比,陶瓷颗粒或晶须增强的不连续增强钛基复合材料(DRTMCs)具有相近的密度(4.5 g/cm^3),但其使用温度可提高 $200 \text{ }^\circ\text{C}$,甚至达到 $600 \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[11]。TiC 是首选的陶瓷颗粒增强体之一,TiC 由于其化学相容性和热力学稳定性,是 Ti 基体中最合适的补强剂之一,由于较高的熔点和硬度,它更适合高温耐磨应用^[12]。冯俊^[13]通过原位反应制备 TiC/Ti 基复合材料,研究表明微量的 TiC 能够提高复合材料的抗压强度和断裂韧性。张新疆^[14]等人利用石墨烯和钛粉末为原材料,制备了原位 TiC/Ti 钛基复合材料,与铸态和烧结态纯钛相比,这种复合材料具有显著提高的硬度和室温抗压强度。但是,TiC 和 Ti 基体之间结构不匹配和热力学的不匹配关系影响复合材料的机械性能^[15]。Ti($\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5}$)是一种金属陶瓷,其本身具有高力学性能、高耐磨、低摩擦系数、高耐腐蚀性、高耐氧化等特点。与 TiC 相比,Ti($\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5}$)与 Ti 基体之间的热膨胀系数匹配度更好^[16],故笔者选择 Ti($\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5}$)作为增强相制备 PTMCs。

粉末冶金技术制备钛基复合材料可以通过原位和非原位两种途径。用非原位的方法,在加工过程中直接引入增强体颗粒,而不显著改变其化学成分^[17],具有成本低、效率高、工艺成熟,所制备的材料性能稳定、成分均匀的优点^[18]。刘嘉威^[19]研究了碳氮化钛粉末的合成,在 $1530 \text{ }^\circ\text{C}$ 时制备得到近似化学式为 $\text{TiC}_{0.547}\text{N}_{0.453}$ 的碳氮化钛粉末。由于 Ti($\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5}$)的合成温度过高,很难采用原位的方法合成 Ti($\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5}$)增强钛基复合材料,故笔者采用外加法制备不同 Ti($\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5}$)颗粒含量的钛基复合材料,研究 Ti($\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5}$)颗粒增强钛基复合材料的显微组织和力学性能。

1 试验材料及方法

试验原料:纯钛(Ti),纯度 99.0%,由上海卜汉化学技术有限公司提供;碳氮化钛($\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$),纯度 99.5%,由四川大学提供;无水乙醇($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$),纯度 99.0%,由成都市科龙化工提供;氩气(Ar),纯度 99.9%,由重庆高德气体有限公司提供;氢氟酸(HF),纯度 99.0%,由成都市科龙化工提供。

钛基复合材料成分设计如表 1 所示,将 4 组粉末分别放入不锈钢球磨罐中,加入无水乙醇并充入氩气,所用磨球为氧化锆球(球料比为 5 : 1),球磨机转速为 150 r/min ,球磨 240 min 。球磨后,取出球磨罐,混合料放入真空干燥箱中, $75 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干 12 h 。称取烘干的粉体材料,在 FY-30A 台式粉末压片机上,用 490 MPa 的压力,压制成 $\text{Ø}25 \text{ mm} \times 13.5 \text{ mm}$ 的压坯,每组材料各压制 3 个试样。将压坯在 CXZW-17-22 型真空钨丝烧结炉中进行烧结,烧结温度为 $1300 \text{ }^\circ\text{C}$,保温 2 h ,得到烧结态钛基复合材料。

表 1 纯钛和钛基复合材料的原料配比
Table 1 Raw materials ratio of pure titanium and titanium matrix composites

材料编号	w(Ti)/%	w(碳氮化钛)/%
A(CP Ti)	100.0	0
B(TMC2)	97.0	3
C(TMC3)	94.0	6
D(TMC4)	91.0	9

将烧结后的复合材料试样经切割、打磨、抛光、超声清洗,然后采用阿基米德法对 Ti($\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5}$)/Ti 复合材料进行密度测量。用 Kroll 试剂($3\% \text{ HF} + 7\% \text{ HNO}_3 + 90\% \text{ H}_2\text{O}$, vol%)进行腐蚀。采用 TD-3000 X 射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD)分析试样的物相成分,电压 40 kV ,电流 40 mA ,衍射角(2θ)范围为 $20^\circ \sim 80^\circ$,Cu 靶。采用 LSXTL18A 倒置金相显微镜和 JEOL-6490 LV 扫描电子显微镜(SEM)观察试样的显微组织,并利用能量色散 X 射线光谱仪(energy dispersive x-ray spectroscopy, EDX)进行成分分析。采用 GD-6025Q 万能工具磨床将试样磨平,采用 HV-100 洛氏硬度测量器测试试样的显微硬度,取 8 个点的平均硬度。采用 WDW-200 型万能材料试验机测定试样的室温压缩性能,位移速度 0.5 mm/min 。

2 结果与讨论

2.1 显微组织结构分析

图 1 为不同 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 含量钛基复合材料的 XRD 图谱。由图 1 可以看出, 添加 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 颗粒后复合材料的组织中除了 $\alpha\text{-Ti}$ 相外, 出现 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 相。且随着 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 含量的增加, $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 衍射峰相对强度增加。表 2 为烧结态钛基复合材料的致密度。可以看出, $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})/\text{Ti}$ 复合材料的致密度都大于 98%, 明显高于纯钛。说明 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 颗粒的添加, 减小了复合材料的孔隙度, 提高了材料的致密度。图 2 为不同 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 含量钛基复合材料的显微组织。由图 2(a) 可以看出, 纯钛由粗大的柱状晶组成, 且纯钛中孔洞较多。添加 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 颗粒后(图 2(b)~(d)), 钛基复合材料晶粒转变为等轴状。且随着增强相含量增加, 晶粒尺寸变小。另外, 当 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 含量为 3% 时, 复合材料的孔洞较多, 而随着 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 含量增加, 孔洞数量明显减少。同时, 复合材料中 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 颗粒分布均匀, 且随着 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 含量的增加, 复合材料中增强相数量明显增多。经测量, 复合材料中增强相颗粒的尺寸为 $6\sim 8\text{ }\mu\text{m}$ 。图 3 为 TMC4 试样的 EDX 能谱分析。为了确认复合材料中增强相的成分, 对 TMC4 试样进行 EDX 分析, 结果如图 3 所示, 可以看出, 增强相颗粒中 C/N 原子比约为 1:1, 结合图 1 XRD 结果, 说明复合材料中添加的

$\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 颗粒在烧结过程中没有发生反应, 增强相依然为 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 颗粒, 且增强颗粒分布较为均匀, 未发生团聚。

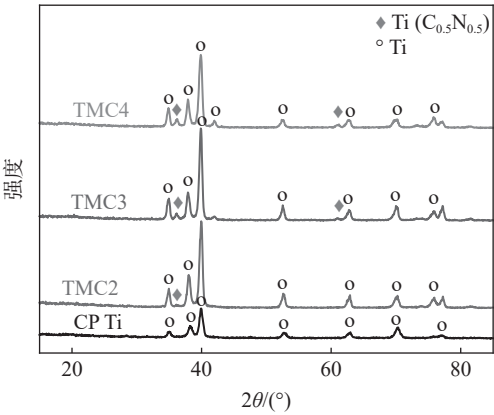


图 1 不同 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 含量的钛基复合材料的 XRD 图谱
Fig. 1 XRD patterns of Ti matrix composites with different $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ contents

表 2 不同 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 含量的钛基复合材料实际密度和理论密度
Table 2 The actual density and theoretical density of Ti matrix composites with different $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ contents

材料编号	实际密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	理论密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	致密度/%
A(CP Ti)	4.34	4.50	96.48
B(TMC2)	4.44	4.52	98.20
C(TMC3)	4.46	4.53	98.60
D(TMC4)	4.48	4.54	98.53

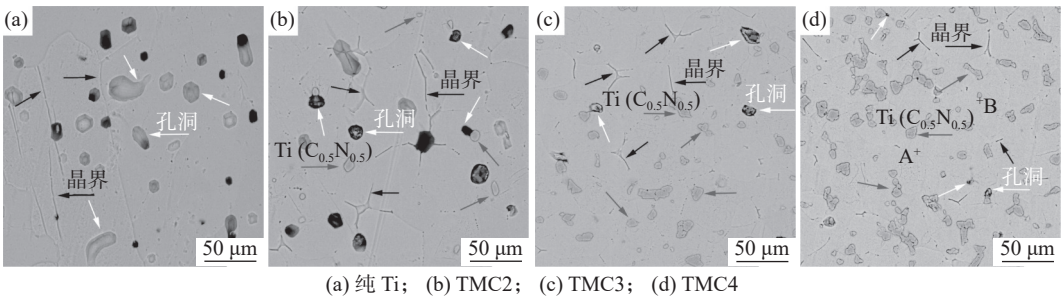


图 2 不同 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 含量的钛基复合材料的显微组织
Fig. 2 Microstructure of Ti matrix composites with different $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ contents

2.2 力学性能分析

图 4 为不同 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 含量钛基复合材料的压缩应力-应变曲线, 表 3 为不同 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 含量钛基复合材料的压缩性能数据。可以看出, 纯钛的屈服强度和抗压强度远低于 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 颗粒增强钛基复合材料。随着 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 含量的增加, 屈服强度也随之增加。复合材料 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 增强相含量由 0 提

高到 9% 时, 屈服强度也由 850 MPa 增加到 1 690 MPa, 提高了 98.8%。但复合材料的抗压强度随着 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 含量的升高, 先升高后略有降低, 当 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 含量为 3% 时, 复合材料的抗压强度达到最高值 2 498 MPa, 且其压缩应变并没有减小, 随着 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 含量进一步增加到 6% 和 9%, 压缩应变明显减小。图 5 为不同 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 含量钛基复合材

料的洛氏硬度。可见,加入了 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 作为增强相的复合材料的硬度相对于纯钛有显著提高。 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 含量为 3% 的复合材料硬度值 (HRC) 达 43.2,较纯钛提高 58.2%。而继续提高 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 的含量到 6% 和 9%,复合材料硬度值提高不明显。

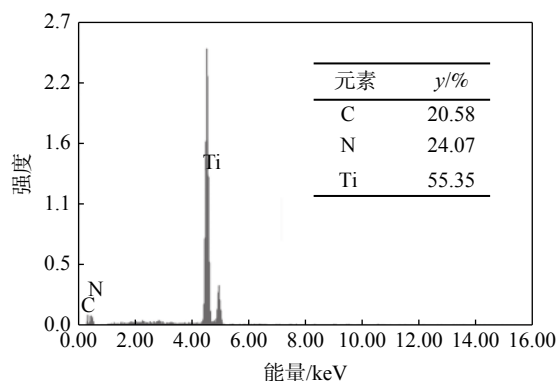


图3 TMC4 试样 EDX 能谱
Fig. 3 EDX spectrum of TMC4 sample

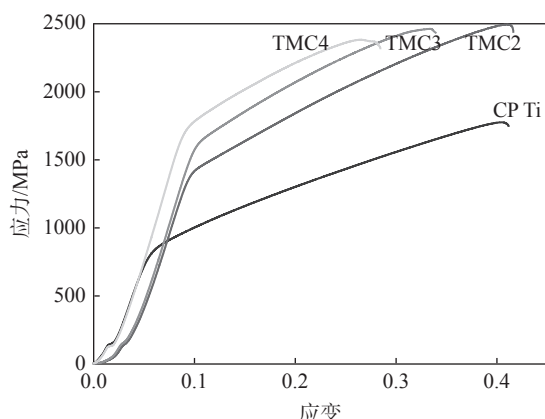


图4 不同 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 含量的钛基复合材料的压缩应力-应变曲线

Fig. 4 Compressive stress-strain curves of titanium matrix composites with different $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ contents

表3 不同 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 含量的钛基复合材料的压缩性能
Table 3 Compression properties of titanium matrix composites with different $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ contents

材料编号	抗压屈服强度/MPa	抗压强度/MPa	压缩应变/%
CP Ti	850.0	1 849.3	41.2
TMC2	1 430.2	2 498.1	41.6
TMC3	1 603.3	2 473.3	33.9
TMC4	1 710.1	2 444.0	28.4

结合 2.1 节中微观组织分析可知,复合材料硬度的提高主要是由于 α -Ti 相的细晶强化作用以及 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 颗粒的承载强化作用。等轴状 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 颗粒会细化基体的晶粒,根据 Hall-Petch 公式, $\sigma = \sigma_0 + kd^{-1/2}$, 式中, σ_0 为未细晶强化材料的

屈服强度, MPa; k 为强化系数, $\text{MPa} \cdot \mu\text{m}^{1/2}$; d 为晶粒直径, μm 。晶粒直径尺寸越小,复合材料的屈服强度和抗压强度越高。此外,由于钛基体与 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 颗粒具有不同的物理性能,当外加载荷时,载荷首先作用于 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 颗粒,然后扩散到钛基体上,此时, $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 颗粒与钛基体发生不协调变形,使得钛基体中的位错密度提高,整体上提高了材料强度^[20]。但是, $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 属于金属陶瓷颗粒,内部容易萌生裂纹,当增强体含量升高时,裂纹扩展越快,容易发生断裂,复合材料断裂应变降低。

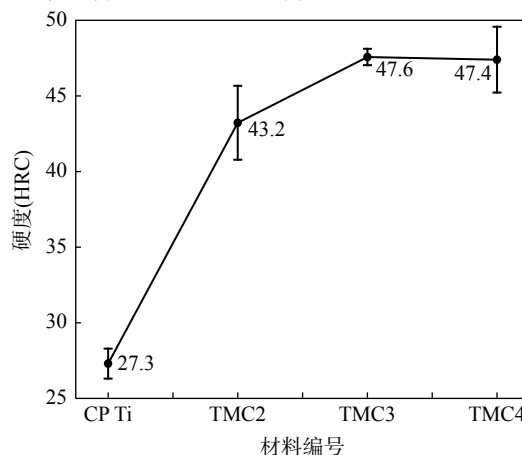


图5 不同 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 含量的钛基复合材料的硬度
Fig. 5 Hardness of titanium matrix composites with different $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ contents

3 结论

由于目前实验室中以 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 为增强体增强钛基复合材料的研究还比较少,故本试验中以纯钛为基体,对 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 增强钛基复合材料进行了理论研究,得到以下主要结论:

1) 增强相 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 颗粒的添加,使得复合材料的晶粒相比于纯钛得到了显著的细化,晶粒从粗大的柱状晶变为规则的等轴状细晶。复合材料中增强相 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 颗粒呈近球形,大小均匀且在基体中弥散分布,未发生团聚。

2) 随着 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 颗粒含量的提高,材料的孔隙度减少, $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 颗粒提高了钛基复合材料的致密度。且随着 $\text{Ti}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ 颗粒含量的增加,复合材料的硬度提高,压缩强度显著增加,但复合材料的应变降低。

3) 以纯钛为基体的复合材料在工业上的应用范围还比较受限,下一步将在本试验的基础上以不同牌号的钛合金作为基体,采用合金化的方法提高复合材料的综合性能,可以极大地扩宽材料的应用范围,广泛地应用于航空航天、汽车和船舶等工业。

参考文献

- [1] Ji Bo, Huang Guangfa, Mao Jianwei. Effect of isothermal extrusion deformation on microstructure and mechanical properties of (TiB+TiC) reinforced titanium matrix composites at room temperature[J]. Titanium Industry Progress, 2018, 35(3): 16–21.
(计波, 黄光法, 毛建伟. 等温挤压变形量对(TiB+TiC)增强钛基复合材料组织和室温力学性能的影响[J]. 钛工业进展, 2018, 35(3): 16–21.)
- [2] Sun Liang. In situ (TiC+TiB) enhanced microstructure regulation and wear resistance of titanium matrix composites[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018.
(孙亮. 原位自生(TiC+TiB)增强钛基复合材料组织调控与耐磨性[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.)
- [3] Han Yuanfei, Le Jianwen, Fang Minghan, *et al.* Preparation, processing and aerospace application of high performance in-situ titanium matrix composites[J]. Progress of Materials in China, 2020, 39(12): 945–954.
(韩远飞, 乐建温, 方旻翰, 等. 高性能原位自生钛基复合材料制备加工与航天应用探索[J]. 中国材料进展, 2020, 39(12): 945–954.)
- [4] Han Yuanfei, Sun Xianglong, Qiu Peikun, *et al.* Research and progress on advanced processing technology of particle reinforced titanium matrix composites[J]. Journal of Composite Materials, 2017, 34(8): 1625–1635.
(韩远飞, 孙相龙, 邱培坤, 等. 颗粒增强钛基复合材料先进加工技术研究进展[J]. 复合材料学报, 2017, 34(8): 1625–1635.)
- [5] Fu Binguo, Li Chaozhi, Liu Jinhai, *et al.* Application and prospect of in-situ synthesis technology in discontinuous reinforced titanium matrix composites[J]. Casting, 2018, 67(4): 312–316.
(付彬国, 李朝志, 刘金海, 等. 原位合成技术在非连续增强钛基复合材料中的应用及展望[J]. 铸造, 2018, 67(4): 312–316.)
- [6] Lai Xiaojun, Li Shaopeng, Han Yuanfei, *et al.* Research progress on composite design and advanced machining technology of multi-dimensional and multi-scale reinforced titanium matrix composites[J]. Titanium Industry Progress, 2020, 37(3): 40–48.
(来晓君, 李劭鹏, 韩远飞, 等. 多元多尺度增强钛基复合材料复合设计与先进加工技术研究进展[J]. 钛工业进展, 2020, 37(3): 40–48.)
- [7] Liu Shifeng, Song Xi, Xue Tong, *et al.* Application and development of titanium alloy and titanium matrix composites in aerospace[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40(3): 77–94.
(刘世锋, 宋玺, 薛彤, 等. 钛合金及钛基复合材料在航空航天的应用和发展[J]. 航空材料学报, 2020, 40(3): 77–94.)
- [8] Zhou Haitao, Kong Fantao, Chen Yuyong. Progress in powder metallurgy of TiAl intermetallic compounds[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(9): 2466–2472.
(周海涛, 孔凡涛, 陈玉勇. TiAl金属间化合物粉末冶金技术研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(9): 2466–2472.)
- [9] Lin Xuejian, Dong Fuyu, Zhang Shixin, *et al.* Effect of (TiC+TiB) content on microstructure and mechanical properties of TC4 alloy[J]. Hot Working Technology, 2019, (6): 133–137.
(林雪健, 董福宇, 张世鑫, 等. 不同含量(TiC+TiB)对TC4合金组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2019, (6): 133–137.)
- [10] Ma F, Zhou J, Liu P, *et al.* Strengthening effects of TiC particles and microstructure refinement in in situ TiC-reinforced Ti matrix composites[J]. Materials Characterization, 2017, 127: 27–34.
- [11] Jiao Y, Huang L, Geng L. Progress on discontinuously reinforced titanium matrix composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 767: 1196–1215.
- [12] Vasanthakumar K, Ghosh S, Koundinya N, *et al.* Synthesis and mechanical properties of TiC, and Ti (C, N) reinforced titanium matrix in situ composites by reactive spark plasma sintering[J]. Materials Science and Engineering:A, 2019, 759: 30–39.
- [13] Feng Jun. Study on microstructure and properties of in situ (TiC, TiB)/Ti matrix composites[D]. Chongqing: Southwest University, 2020.
(冯俊. 原位生成(TiC、TiB)/Ti基复合材料的组织与性能研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020.)
- [14] Zhang X, Song F, Wei Z, *et al.* Microstructural and mechanical characterization of in-situ TiC/Ti titanium matrix composites fabricated by graphene/Ti sintering reaction[J]. Materials Science and Engineering:A, 2017, 705: 153–159.
- [15] Mao Xiaonan. Effect of internal stress on mechanical properties of TiC particle reinforced titanium matrix composites[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004.
(毛小南. TiC颗粒增强钛基复合材料的内应力对材料机械性能的影响[D]. 西安: 西北工业大学, 2004.)
- [16] Ren Weiwei. Preparation and properties of TiCN composite ceramics[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018.

- (任伟玮. TiCN复合陶瓷的制备及性能探究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018.)
- [17] Lagos M A, Agote I, Atxaga G, *et al.* Fabrication and characterisation of titanium matrix composites obtained using a combination of self propagating high temperature synthesis and spark plasma sintering[J]. *Materials Science and Engineering:A*, 2016, 655: 44–49.
- [18] Li Ziyang, Wang Sijia, Deng Wenju. Research progress of ceramic particle reinforced metal matrix composites[J]. *Light Industry Science and Technology*, 2021, 37(4): 41–44.
(李滋阳, 王思佳, 邓文举. 陶瓷颗粒增强金属基复合材料研究进展[J]. 轻工科技, 2021, 37(4): 41–44.)
- [19] Liu Jiawei. Carbon titanium nitride powder synthesis and molding process of the research[D]. Xiamen: Xiamen institute of technology, 2020.
(刘嘉威. 碳氮化钛粉末的合成及其成型工艺研究[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2020.)
- [20] Du Kanghong, Liu Zhongqiang, Zhang Jiantao, *et al.* Microstructure and properties of TiC reinforced TC4 composites prepared in situ based on high throughput [J/OL]. *Powder Metallurgy Materials Science and Engineering*: 1–10. [2021-12-29]. DOI:10.19976/j.cnki.43-1448/TF.2021070.
(杜康鸿, 柳中强, 张建涛, 等. 基于高通量的原位制备网状结构TiC增强TC4复合材料的组织与性能[J/OL]. 粉末冶金材料科学与工程:1–10.[2021-12-29]. DOI:10.19976/j.cnki.43-1448/TF.2021070.)

编辑 杨冬梅

攀钢研究院牵头制定的钒铁国家标准正式发布

(2022 年 6 月 13 日消息) 日前, 国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会发布了由攀钢研究院牵头研制的国家标准《GB/T 41497—2022 钒铁 钒、硅、磷、锰、铝、铁含量的测定 波长色散 X 射线荧光光谱法》已正式获批准发布, 将于 2022 年 11 月起实施。

钒铁是以钒和铁为主要成分组成的铁合金, 是炼钢的合金添加剂, 可显著提高钢的硬度、强度、耐磨度等性能, 因工艺和后续产品使用要求, 须对不同牌号钒铁中的主量元素和微量元素含量进行质量监控, 现行国家标准中, 钒铁的产品标准 GB/T 4139—2012 规定了钒铁的技术要求, 而在波长色散 X 射线荧光光谱法发布之前, 对钒铁中化学成分的测定方法主要采用传统化学手工分析方法, 存在分析步骤繁多、单元素检测、分析时间较长、消除干扰措施复杂等不足, 且检测过程中产生有害气体及废液造成环境污染, 既难以满足批量快速检测要求, 也不符合国家绿色环保要求。随着仪器检测分析技术的开发和进步, 采用大型精密仪器替代传统化学分析方法已是大势所趋, 可以提高工作效率, 并且减少“三废”排放、降低环保压力。X 射线荧光光谱法具有试样处理相对简单、多元素同时测定、重现性好和精密度高等优点。为了进一步丰富钒铁的国家标准检测分析体系, 适应现代快速生产管理要求, 有必要针对钒铁研究并建立 X 射线荧光光谱法国家标准。

攀钢研究院试验人员数年前就开始尝试使用波长色散 X 射线荧光光谱法测定钒铁中的主微量元素, 经过多年的技术沉淀, 形成了一套独有的分析方法, 该方法具有快速且能够同时分析钒铁中多项主微量元素成分具有性能指标优良等特点。为推广该方法、共享知识成果, 规范国家在钒铁利用领域的质量控制, 攀钢积极向国家标准化管理委员会建议将此方法列为国家标准方法, 最终于 2019 年 4 月立项, 2021 年 6 月成功通过专家审定。相关专家指出, 该国家标准是首次将波长色散 X 射线荧光光谱法应用到钒铁主微量元素成分分析中, 符合高效、绿色环保检测的新趋势, 具有国际先进水平, 对行业具有引领意义、影响重大。

(袁金红、於利慧 供稿)