

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.010

TiB₂ 颗粒增强钢基复合材料制备研究现状

王波¹, 嵇彬², 陈海瑞³, 李晓鹏³, 彭勇³, 王克鸿³

(1. 江苏烁石焊接科技有限公司, 江苏 南京 210014;

2. 中石化第十建设有限公司, 山东 青岛 266520;

3. 南京理工大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 210094)

摘 要:当前大型结构件的制造具有轻量化的趋势,对材料的强度和密度提出了新的要求,因此 TiB₂ 颗粒增强钢铁基复合材料受到了国内外广泛的关注。基于对国内外 TiB₂ 颗粒增强钢基复合材料的相关研究成果,对现有的 TiB₂ 增强钢基复合材料制备技术进行阐述,分析不同制备工艺的优缺点,论述 TiB₂ 增强钢基复合材料组织工艺优化的现状。

关键词:轻量化; TiB₂; 钢铁基复合材料; 制备技术; 增材制造

中图分类号: TB33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)03-0052-05

Research Status of Preparation of TiB₂ Particle Reinforced Steel Matrix Composites

WANG Bo¹, JI Bin², CHEN Hairui³, LI Xiaopeng³, PENG Yong³, WANG Kehong³

(1. Jiangsu Shuoshi Welding Technology Co., Ltd., Nanjing 210014, China;

2. Sinopec Tenth Construction Co., Ltd., Qingdao 266520, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The present trend of lightweight manufacturing for major structural components has generated new requirements for material strength and density, arousing much attention to TiB₂ particle-reinforced steel matrix composites. Based on the relevant research results of TiB₂ particle-reinforced steel matrix composites, this article elaborates the existing preparation technologies of TiB₂ reinforced steel matrix composites, analyzes the advantages and disadvantages of different preparation processes, and discusses the current situation of optimizing the microstructure process of TiB₂ reinforced steel matrix composites.

Keywords: lightweight; TiB₂; steel matrix composites; preparation technology; additive manufacturing

0 引言

目前的钢结构设计研究方向是多方面的,如进一步提高耐蚀性、耐磨性、高温稳定性、吸能能力等。结构的轻量化设计关键在于增加强度和降低密度。通过在钢中添加轻质合金元素进行合金化的方法可以有效地降低复合材料的密度,但同时也引起材料强度的下降^[1-7]。在实际应用中,需要用构件的尺寸来补偿这种固有刚度损失,轻质合金的减重潜力也随之被减弱甚至完全抑制。因此为了克服这种模量和密度之间的不利关系,陶瓷颗粒增强钢基复合材料已经引起了广泛的关注^[8-11]。对于添加增强相的复合材料而言,增强相的种类是至关重要的。在复合材料的强化过程中,应力从基体中传递到增强相上,如果基体和增强相的界面结合比较差,那么在增强相承受载荷

之前,界面首先失效,成为复合材料断裂的地方。目前作为钢基增强体的陶瓷颗粒主要有 WC、SiC、TiN、TiB₂、TiC 等, TiB₂ 具有高硬度、低密度、高熔点的特点且具有良好的耐磨性和耐腐蚀性,是钢基复合材料中最有效的增强材料之一^[12-19]。TiB₂ 作为一种增强相,与钢基体具有良好的润湿性和稳定性^[20-25],基体与增强相之间的界面反应和黏结良好,可以实现减重增强的目的,非常适合作为钢基复合材料的增强体。

1 国内外研究现状

1.1 TiB₂ 增强钢基复合材料制备技术

1) 粉末冶金

粉末冶金由于其固有的简单性,已成为生产钢基复合材料的一种基本方法。它包括粉末混

第一作者简介:王波(1979—),男,辽宁抚顺人,高级工程师,硕士,研究方向为智能焊接与高效增材等工程化应用, rayhan@njjust.edu.cn。

合、冷压和传统烧结、热压。FARID 等^[26]利用 TiB₂-TiC 作为增强相通过粉末冶金技术成功制备了钢基复合材料。在 1 400 ℃ 条件下, Ti、C、FeB 粉末在钢基体中原位反应烧结制备了 TiB₂-TiC 增强材料。在钢基体中发现呈六边形棱柱状的 TiB₂ 和球状 TiC, 增强体的晶粒尺寸分布范围较宽。

2) 真空感应熔炼

感应加热技术是指在真空条件下, 利用电磁感应加热的原理来熔炼金属。真空感应炉中电流以一定的频率通过环绕在金属炉料周围的电磁线圈, 并在金属炉料内部产生感应电动势使金属炉料内部产生涡流, 产生大量的热量来加热炉料。BARON 等^[27]将 TiO、TiO_{1.83} 和 TiO₂ 与 Al 通过直接添加和预混的方式添加到 Fe-B 熔体中, 研究了用铝原位还原钛氧化物从而原位制备 TiB₂ 增强钢基复合材料的方法。对铝预混 TiO_{1.83} 试验得到的铸锭样品进行了相识别, 结果显示 TiB₂ (绿色) 和 Fe₂B (蓝色) 在铁素体 Fe (红色) 基体中随机分布。

3) 放电等离子体烧结

放电等离子烧结, 简称 SPS, 是近年来发展起来的一种新型的快速烧结技术。该技术利用通常放电加工所引起的烧结促进作用以及脉冲放电初期粉体间产生的火花放电现象 (瞬间产生高温等离子体) 所引起的烧结促进作用, 通过瞬时高温场实现致密化。LIU 等^[28]首先利用机械合金化的方法制备了复合粉末, 然后使用放电等离子烧结方法制备了不同含量 TiB₂ 的 Fe-15Cr-8Al-20Mn 基复合材料。放电等离子烧结的应用对复合材料的微观结构产生了一定的影响, 并形成了新的复合 CrFeB 型、Mn₂B 型硼化物和 Fe₂AlCr 相。

4) 氩弧熔覆技术

氩弧热量集中, 能量密度介于自由电弧和压缩弧之间, 而且一般实行手工操作, 灵活性高。采用氩弧熔覆制备的涂层在加热冷却过程中无氧化烧损现象。氩弧熔覆技术同样可以有效地提高熔覆材料的表面硬度, 改善材料表面耐磨性, 而且具有投资和运行费用低、操作方便、结合牢固等优点。王振廷等^[29]采用氩弧熔铸技术, 以 Fe、Ti、B 和 C 粉为原料, 原位合成 TiC-TiB₂/Fe 复合材料。结果表明: 复合材料由原位生成的 TiB₂ 和 TiC 增强颗粒相及 α-Fe 相组成, 颗粒呈块状、板条状和多边形, 且颗粒结合得很紧密。复合材料在室温干滑动磨损条件下, 该熔铸复合材料的耐磨性约

是 GCr₁₅ 工具钢的 6 倍。

结合 TiB₂ 增强钢基复合材料的研究现状, 目前传统的制备技术主要包括粉末冶金、液相冶金合成、自蔓延高温合成、放电等离子烧结、真空感应熔炼、氩弧熔覆技术等。这些传统的制备技术在工艺参数合适的情况下可以实现陶瓷增强钢基复合材料的致密烧结, 但是针对复杂的结构件或需定制的小批量产品, 传统制备方法往往受到成形模具制造的限制。通过激光熔覆增材制造的方式可以用来实现陶瓷增强钢铁基复合材料的制备, 与传统制备复合材料的方法相比, 激光熔覆增材制造技术优点集中在以下几个方面^[30-31]: 产品的设计及制造周期缩小, 更加适合工业化生产。对于形状较为复杂的构件, 传统的方法难以快速制造, 而激光熔覆增材制造作为一种柔性制造的手段, 可以直接成形相对复杂的结构件, 需要的后处理步骤更少。最重要的是激光熔覆增材制造技术可以实现增强体体积分数、沉积零件几何尺寸以及微观组织性能的自由设计。

1.2 TiB₂ 增强钢基复合材料激光增材制造研究现状

高能激光的相互作用导致材料的超快加热和熔化, 这不可避免地导致了材料在冷却过程中的快速凝固。激光增材制造工艺通常在熔池的固液界面加热/冷却, 通过衬底热传导产生的淬火速率足够快, 可以产生快速凝固的微结构。熔池内的化学浓度或温度梯度可能会产生表面张力梯度和由此产生的 Marangoni 对流, 这使得激光工艺快速凝固的过程成为非平衡的凝固过程。同时, 激光工艺的快速凝固具有晶体生长的动力学限制, 通常遵循最大热流方向。上述两种机制在激光熔覆增材制造的过程中同时存在, 从而激光作用下 TiB₂ 增强钢基复合材料组织与传统制备方式有所不同, 进一步对复合材料性能产生影响。

1) TiB₂ 增强钢基复合材料激光增材制造组织特征

SALMAN 等^[32]研究了添加微米级 TiB₂ 对激光选择性激光熔炼法制备的 TiB₂/316L 不锈钢组织和力学性能的影响。高冷却速率导致精细的胞状微观结构和较细的亚晶粒, 如图 1 所示。TiB₂ 导致显著的微观结构细化。通过图 2 的 TEM 研究发现晶粒尺寸为 3~5 μm 大小; 亚晶粒和晶界存在 Cr-Fe 相。非晶 TiB₂ 粒子均匀分布在整个晶粒中, 其大小约为 50~100 nm。

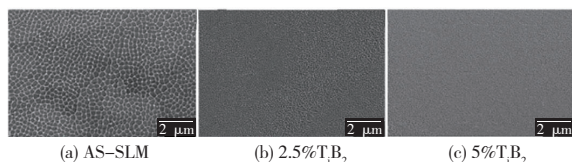
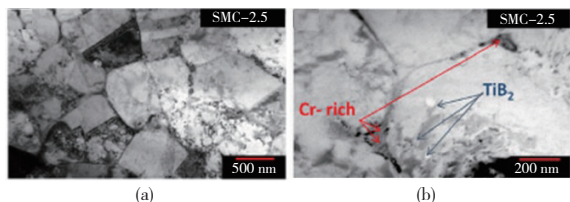
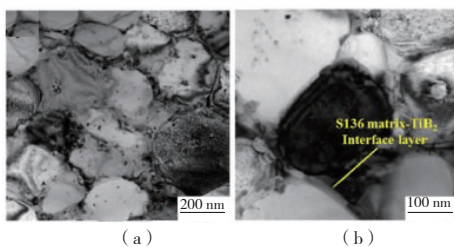


图1 316 L 基复合材料的胞状微观结构特征

图2 SMC-2.5(2.5% TiB₂) 复合材料的 TEM 图像

AIMANGOUR 等^[33]研究了纳米级增强体含量对经选区激光熔化(SLM)处理 TiB₂ 增强的 316L 不锈钢微观组织演变和力学性能的影响。常规的枝晶凝固特征在 SLM 之后没有形成,相反,由于次生枝晶臂生长不足,形成了定向的胞状微观结构,可以观察到连续的、精细的环状结构。此外由于“球化”效应,SLM 过程中复合材料产生大量的球状冶金缺陷。

HU 等^[34]采用选择性激光熔炼法制备了不同质量分数 TiB₂(0~2.5 wt%) 的 S136 钢基复合材料。通过 TEM 和 EDS 分析,在 0.5 wt% TiB₂/S136 复合材料存在细小的等轴晶(图3)。TiB₂ 纳米颗粒主要分布在晶界处且分布均匀,可以抑制晶粒长大,提高力学性能。S136 基体与 TiB₂ 纳米颗粒之间出现了界面层,这也有利于提高综合力学性能,特别是强度的提升。

图3 SLM 0.5 wt% TiB₂/S136 复合材料的 TEM 图像和 EDS 分析

WEN 等^[35]研究了纳米 TiB₂ 含量对 SLM S136 模具钢的微观结构演变和力学性能的影响。TiB₂ 在边界中的含量高于晶粒中的含量, TiB₂ 沿晶界沉积,同时发现晶界成为基体和 TiB₂ 金属-陶瓷界面。TiB₂ 纳米颗粒不仅在晶界分布均匀,而且在晶粒中分布均匀。它会有效地阻碍晶粒在一定

温度下的生长以及在较高载荷下的位错滑移。

AIMANGOUR 等^[36]研究了 TiB₂ 纳米颗粒增强相对 316L 不锈钢基体组织和高温变形行为的影响。研究发现合金元素在边界处偏析,特别是在较高浓度的 TiB₂ 下。TEM 结果表明:在边界和胞状结构内部观察到各种尺寸的纳米级 TiB₂ 颗粒。高的凝固速率导致 TiB₂ 晶粒生长时间的缩短,在试样中发现了立方体状的颗粒。复合材料的强化是通过细小的 TiB₂ 颗粒沉淀强化实现。

2) 力学强化机制

首先,随着晶粒尺寸的减小,晶界面积增大,这意味着有更多的障碍可以阻止位错运动,迫使位错在晶界附近纠缠和堆积。其次,相邻的 TiB₂ 纳米粒子之间的相互连接得到改善,同时基体的晶界得到强化。增强/基体界面的强键合有效地改善了载荷传递,从而提高了 TiB₂ 增强钢基复合材料的屈服强度。此外,由于 Orowan 环的形成,增强材料沿晶界均匀分布,有效地抑制了塑性变形过程中裂纹的扩展,提高了纳米复合材料的延展性。同时,合金元素在晶界处的沉淀也能阻碍位错的发生,强化复合材料。

2 结论与展望

1) TiB₂ 颗粒增强钢基复合材料由于其界面结合强度较高从而带来良好的综合性能,已经受到了广泛的关注。在失效的过程中,增强体颗粒的断裂是复合材料的主要损伤特征,因此,获得有利的增强体形貌、尺寸、分布已成为复合材料工艺优化的主要目标。由于激光的快速凝固和强烈的对流效应,通过激光熔覆制造的 TiB₂ 增强钢基复合材料组织细化,表现出特殊的胞状微观结构,并且 TiB₂ 颗粒及合金元素在边界处偏析。激光熔覆制造的 TiB₂ 增强钢基复合材料的组织有效提升了力学性能,其强化机制为弥散强化、晶界强化、细晶强化。

2) TiB₂ 与基体之间存在界面且可以改善增强体-基体冶金结合和力学性能,通过分子动力学模拟、有限元模拟、实验分析测试手段相结合的方式,可以弥补相关研究的空缺,阐明 TiB₂ 增强钢基复合材料界面强化机制。未来应继续探索钢基复合材料的设计、制备和性能调控方法以实现更好的性能和应用。在厘清界面强化机制后,可以更好地开发新的金属基复合材料。例如,碳纳米管增强金属基复合材料、石墨烯增强金属基复合材料等具有很高的研究和应用价值。

参考文献:

- [1] SHAMSDINI S,PIRGAZI H,GHONCHEH M H,et al. A relationship between the build and texture orientation in tensile loading of the additively manufactured maraging steels[J]. Additive Manufacturing,2021,41:101954.
- [2] SPRINGER H, BARON C, MOSTAGHIMI F, et al. Additive manufacturing of high modulus steels: new possibilities for lightweight design [J]. Additive Manufacturing,2020,32:101033.
- [3] NOURI N,LI Q,SCHNEIDER R,et al. Characterization of phase transformation and strengthening mechanisms in a novel maraging steel produced using laser - based powder bed fusion[J]. Materials Characterization,2024, 207:113522.
- [4] AICHOUCI I,EL MAGRI A, HAMMOUTI B. Influence of laser power and scan speed on porosity, microhardness, and corrosion resistance in HCl medium of additively manufactured H13 tool steel [J]. Progress in Additive Manufacturing,2025;4-29.
- [5] MAZEEVA A, MASAYLO D, KONOVA G, et al. Multi-metal additive manufacturing by extrusion - based 3D printing for structural applications: a review [J]. Metals, 2024,14(11):1296.
- [6] LI Y N, FANG W P, GUO S, et al. In-situ reinforced Ti₆Al₄V-TiB₂ titanium matrix composite fabricated by selective laser melting: microstructure, mechanical properties and heat treatment [J]. Materials Characterization,2024,212:113952.
- [7] SOLEIMANI F, ADELI M, SOLTANIEH M, et al. Fabrication and wear behavior of TiC/TiB₂ - reinforced NiAl intermetallic matrix composites [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 30: 5770-5784.
- [8] NOURI N, LI Q, DAMON J, et al. Characterization of a novel maraging steel for laser-based powder bed fusion: optimization of process parameters and post heat treatments [J]. Journal of Materials Research and Technology,2022,18:931-942.
- [9] 霍鹏丞,柳佑涛,白培康,等. 深冷处理时间对激光粉末床熔化沉积 TiC/TC4 钛基复合材料组织演变及力学性能的影响 [J]. 精密成形工程, 2024, 16(9): 123-135.
- [10] KARLAPUDY S P, NANCHARAI AH T, SUBBA RAO V V. Influence of post - heat treatment on microstructure, texture, and mechanical properties of 18Ni - 300 maraging steel fabricated by using LPBF technique [J]. Progress in Additive Manufacturing, 2024,9(6):1667-1682.
- [11] XU T Z, ZHANG S, DU Y, et al. Development and characterization of a novel maraging steel fabricated by laser additive manufacturing [J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 891:145975.
- [12] HU H, WEN S F, DUAN L C, et al. Enhanced corrosion behavior of selective laser melting S136 mould steel reinforced with nano - TiB₂ [J]. Optics & Laser Technology,2019,119:105588.
- [13] SONG B N, KENEL C, DUNAND D C. 3D ink - extrusion printing and sintering of Ti, Ti-TiB and Ti-TiC microlattices [J]. Additive Manufacturing, 2020, 35:101412.
- [14] HAN C J, BABICHEVA R, CHUA J D Q, et al. Microstructure and mechanical properties of (TiB + TiC) / Ti composites fabricated in situ via selective laser melting of Ti and B₄C powders [J]. Additive Manufacturing,2020,36:101466.
- [15] ZHOU S Y, OMIYA K, UEDA Y, et al. Fe/polymer joining via Fe/TiB₂ composite structures via in situ laser-induced reaction of Fe-Ti-B system: effect of powder composition [J]. Journal of Advanced Joining Processes,2024,10:100249.
- [16] 李晨静,刘恩硕,刘昊然,等. 微纳 TiB₂ 颗粒混杂增强 Fe 基复合材料的制备及其组织和性能 [J]. 粉末冶金工业,2025,35(1):23-30.
- [17] 梁艳峰,刘道恂,夏峰,等. TiC-TiB₂/Al-xSi-4.5Cu 复合材料的制备与性能 [J]. 热加工工艺,2025(9): 92-97.
- [18] PORTER Q, DU W C, MA C. Selective laser melting of 316L stainless steel: porosity dependence on geometric feature size [J]. Manufacturing Letters, 2024, 41: 903-906.
- [19] WANG S Y, WANG Y F, MA W J, et al. Laser power bed fusion of TiB₂/Cu composite: densification, microstructure, and properties [J]. Materials Characterization,2025,222:114833.
- [20] ANAL A, BANDYOPADHYAY T K, DAS K. Synthesis and characterization of TiB₂ - reinforced iron - based composites [J]. Journal of Materials Processing Technology,2006,172(1):70-76.
- [21] ZHENG Y W, XU H, KONG X, et al. Effects of trace nano - TiB₂ particles and multiple cooling rates on microstructure and properties of Al - 4.5Cu alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds,2024,1005:175982.
- [22] CHEN S, NIU P L, FU X R, et al. Significant improvement in tensile shear properties of friction stir lap welded nano TiB₂/2024 Al composite joints via a novel tool pin geometry design [J]. Materials Characterization,2024,214:114075.
- [23] ZHAO Y, CHEN J H, ZHAO G, et al. Significant grain refinement in 17 - 4PH stainless steels by in situ alloying with TiB₂ additives during laser powder - bed fusion [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2025,56(1):340-358.
- [24] VIDILLI A L, OTANI L B, KOGA G Y, et al. In-situ synthesis and characterization of lightweight steel matrix

- composites reinforced by TiB₂ [J]. Journal of Alloys and Metallurgical Systems, 2024, 7: 100093.
- [25] DAMMAK M, BOUHAMED A, JRAD H, et al. In situ experimental characterization and numerical investigation of Fe - TiB₂ Steel Matrix Composite behavior considering fully coupled damage model: simulation during incremental forming process [J]. Materials Today Communications, 2024, 38: 107741.
- [26] FARID A, GUO S J, CUI F G, et al. TiB₂ and TiC stainless steel matrix composites[J]. Materials Letters, 2007, 61(1): 189-191.
- [27] BARON C, SPRINGER H, RAABE D. Efficient liquid metallurgy synthesis of Fe-TiB₂ high modulus steels via in situ reduction of titanium oxides [J]. Materials & Design, 2016, 97: 357-363.
- [28] LIU J, CHEN W P, CHEN L, et al. Microstructure and mechanical behavior of spark plasma sintered TiB₂/Fe-15Cr-8Al-20Mn composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 747: 886-894.
- [29] 王振廷, 高红明. 氩弧熔铸 TiC-TiB₂/Fe 复合材料的组织与耐磨性[J]. 黑龙江科技大学学报, 2014, 24(4): 393-396.
- [30] KATO H, MATSUMOTO K, ITO Y, et al. Milling of TiB₂ particle reinforced high - modulus steel [J]. International Journal of Automation Technology, 2024, 18(3): 358-365.
- [31] LI C D, LI Y L, ZOU Y Z, et al. Thermal fatigue performance enhancement of new high - Cr martensitic die steels based on overall microstructure manipulation by trace TiC-TiB₂ nanoparticles[J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 901: 146468.
- [32] SALMAN OO, GAMMER C, ECKERT J, et al. Selective laser melting of 316L stainless steel: influence of TiB₂ addition on microstructure and mechanical properties[J]. Materials Today Communications, 2019, 21: 100615.
- [33] ALMANGOUR B, GRZESIAK D, YANG J M. Rapid fabrication of bulk - form TiB₂/316L stainless steel nanocomposites with novel reinforcement architecture and improved performance by selective laser melting[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 680: 480-493.
- [34] HU H, WEN S F, DUAN L C, et al. Enhanced corrosion behavior of selective laser melting S136 mould steel reinforced with nano - TiB₂ [J]. Optics & Laser Technology, 2019, 119: 105588.
- [35] WEN S F, HU H, ZHOU Y, et al. Enhanced hardness and wear property of S136 mould steel with nano-TiB₂ composites fabricated by selective laser melting method[J]. Applied Surface Science, 2018, 457: 11-20.
- [36] ALMANGOUR B, KIM Y K, GRZESIAK D, et al. Novel TiB₂ - reinforced 316L stainless steel nanocomposites with excellent room - and high - temperature yield strength developed by additive manufacturing [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 156: 51-63.

收稿日期: 2023 - 07 - 21

(上接第 22 页)

5 结语

1) 设计了研磨维修设备、截止阀模拟体和试验台架, 研究出高温气冷堆氦气截止阀维修的作业参数和特征指标。

2) 按照所述思路对阀门维修研磨后, 经阀门密封性测试, 结果达到内漏标准, 验证维修方法可行。

3) 所研制的维修设备可用于高温气冷堆氦气截止阀密封面的维修, 经试验证明效果良好。

参考文献:

[1] 胡明, 毛彦恒. 天然气流速过快导致双作用节流截止

阀失效分析及对策[J]. 管道技术与设备, 2018(4): 30-32, 46.

[2] 胡静波, 汤文成. 安全壳通风隔离阀密封性能的有限元分析[J]. 机械制造与自动化, 2008, 37(1): 29-32.

[3] 彭俊杰. 核电站气动截止阀常见故障及维修[J]. 现代制造技术与装备, 2018, 54(6): 140, 142.

[4] 任立斌, 钟亮, 丘贵彬, 等. 核电厂阀门密封面常见缺陷及焊接修复策略[J]. 设备管理与维修, 2023(9): 87-90.

[5] 张威. 阀门密封技术研究现状及发展趋势分析[J]. 阀门, 2020(5): 21-24.

收稿日期: 2024 - 02 - 23