

TiC_p/Cr15高铬铸铁复合材料的制备与性能

吕蓉 肖平安 顾景洪 古思敏 赵吉康

Preparation and properties of TiC_p/Cr15 high chromium cast iron composites

LV Rong, XIAO Ping'an, GU Jinghong, GU Simin, ZHAO Jikang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201119.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超声辅助制备 β -磷酸三钙/Mg-Zn-Ca生物复合材料及性能

Ultrasonic aided fabrication and properties of β -tricalcium phosphate/Mg-Zn-Ca biocomposites

复合材料学报. 2019, 36(9): 2131–2138 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181212.001>

挤压包覆轧制对SiC_p增强镁合金(AZ91)复合板显微组织和力学性能的影响

Effect of extrusion-cladding rolling on microstructure and mechanical property of SiC_p reinforced magnesium alloy(AZ91) clad plate

复合材料学报. 2020, 37(1): 164–172 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190505.003>

Al₃Ti/A356铝基复合材料的显微组织及拉伸力学性能

Microstructure and high temperature mechanical properties of Al₃Ti/A356 aluminum matrix composite by in situ reaction

复合材料学报. 2021, 38(9): 2989–2996 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201126.001>

搅拌铸造法制备短碳纤维/AZ91复合材料的组织与性能

Microstructure and mechanical properties of short carbon fiber/AZ91 composite fabricated by stir-casting

复合材料学报. 2019, 36(1): 159–166 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180613.003>

放电等离子烧结Ni/TiB₂-TiC复合材料微观组织及磨损性能

Microstructure and wear properties of Ni/TiB₂-TiC composites prepared by spark plasma sintering

复合材料学报. 2018, 35(1): 158–167 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170821.007>

钢-聚丙烯纤维增强人造花岗岩复合材料的制备与性能

Preparation and properties of steel-polypropylene fiber reinforced artificial granite composite

复合材料学报. 2020, 37(8): 1823–1831 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191206.006>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

TiC_p/Cr15 高铬铸铁复合材料的制备与性能

分享本文

吕蓉, 肖平安*, 顾景洪, 古思敏, 赵吉康

(湖南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410082)

摘要: 以 TiC_p 粉末和水雾化 Cr15 高铬铸铁粉末为原料, 采用粉末冶金液相烧结技术制备 TiC_p 增强高铬铸铁复合材料。研究了 TiC_p 含量对高铬铸铁的物相组成、显微组织和力学性能的影响。研究表明, 全致密的 TiC_p 增强高铬铸铁基体复合材料的构成相为 TiC、M₇C₃ 型碳化物、马氏体和少量奥氏体; 随着 TiC_p 添加量增大, 金属基体逐步呈孤岛状, 并在其中析出越来越多的 M₇C₃ 型碳化物, 同时 TiC_p 逐步呈连续网状分布; 同时, 其硬度稳步提升, 而抗弯强度和冲击韧性降低。当 TiC_p 添加量为 20wt% 时烧结态复合材料具有最佳综合力学性能。此时硬度为 HRC 66.8, 冲击韧性为 6.86 J/cm², 抗弯强度为 1 343.10 MPa。当 TiC_p 添加量为 25wt% 时硬度达到最大值 HRC 67.20。

关键词: 高铬铸铁; TiC_p; 复合材料; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TB333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2021)09-2964-09

Preparation and properties of TiC_p/Cr15 high chromium cast iron composites

LV Rong, XIAO Ping'an*, GU Jinghong, GU Simin, ZHAO Jikang

(School of Material Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: TiC_p reinforced high chromium cast iron composites with full density have been fabricated by liquid phase sintering technology with water atomized Cr15 high chromium cast iron powders and TiC particles as raw materials. The effect of TiC content on the microstructure evolution, phase composition and mechanical properties was investigated systematically. The research results show that the composites consist of TiC, M₇C₃ type carbides, martensite and a small amount of austenite; With the increase of TiC_p addition, the metal matrix is gradually partitioned into island-like fragments, and M₇C₃ type carbides are principally precipitated in them. Hence continuous TiC particle network is formed step by step either. The composites' hardness steadily increases at the same time, while both its bending strength and impact toughness decline. The sintered composite obtains its optimized mechanical quality as the TiC_p addition amount is 20wt%, that is hardness of HRC 66.8, the impact toughness of 6.86 J/cm² and bending strength of 1 343.10 MPa. Its hardness reaches the maximum value of HRC 67.20 while 25wt% TiC_p is added.

Keywords: high chromium cast iron; TiC_p; composite; microstructure; mechanical property

硬质合金由于具有很高的硬度、强度、耐磨性和耐腐蚀性, 被誉为“工业牙齿”。随着我国国民经济的快速增长, 硬质合金的市场需求不断加大^[1-2]。根据 2019 年国家粉末冶金协会统计, WC-Co 类硬质合金按切削刀片、矿用合金、棒材和耐磨零件四大类进行划分, 耐磨零件的市场份

额约占 27%。但从成本和能源方面考虑^[3], 硬质合金的原材料昂贵、生产工艺复杂和比重大, 是企业在选用硬质合金作为磨损材料时必须慎重考虑的经济问题。这使研发制备一种成本更低但性能可与硬质合金相媲美的新型硬质材料具有很强的市场吸引力。

收稿日期: 2020-09-24; 录用日期: 2020-11-08; 网络首发时间: 2020-11-19 16:16:53

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201119.001>

基金项目: 国家自然科学基金 (51574119)

通信作者: 肖平安, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为粉末冶金制备高性能高铬铸铁材料 E-mail: changcluj@163.com

引用格式: 吕蓉, 肖平安, 顾景洪, 等. TiC_p/Cr15 高铬铸铁复合材料的制备与性能 [J]. 复合材料学报, 2021, 38(9): 2964-2972.

LV Rong, XIAO Ping'an, GU Jinghong, et al. Preparation and properties of TiC_p/Cr15 high chromium cast iron composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(9): 2964-2972(in Chinese).

高铬铸铁 (High chromium white iron, HCCI) 作为典型白口铸铁之一, 具有高强度、高耐磨性和低成本等特点, 在低冲击、低应力磨损条件下具有优良的耐磨性^[4], 被广泛应用于矿石破碎机、滚筒球磨机衬板和泥浆泵叶轮等产品^[5-8], 但是与硬质合金相比, 在硬度与耐磨性能方面还有一定的差距。HCCI 的磨损性能主要受硬质相和基体组织的影响, 增强 HCCI 耐磨性的主要方法有表面涂层、表面改性和添加陶瓷增强相^[9], 其中添加陶瓷相增强钢铁基复合材料是先进复合材料的重要组成部分, 是近年来耐磨材料领域的研究热点, 不少科研人员对硬质相增强 HCCI 开展了研究。

刘相熠等^[10]采用铸造法制备自生 TiC 增强 HCCI 复合材料, 通过将 HCCI 金属液浇注到碳粉、铁粉和钛粉预制体中得到 TiC 增强铁基复合材料, 该复合材料的三体磨损性能是热处理态标样高铬铸铁的 1.75 倍, 最高平均维氏硬度达到 1 076.2 HV; 董晓蓉等^[11]利用铸造烧结法制备 (Ti, W)C 表面增强 Cr26 HCCI 复合材料, 先用粉末冶金法制备增强坯体, 再将 HCCI 金属液重力浇注到增强坯中, 获得 HCCI 复合材料。此法使耐磨性提高了 1.2 倍, 复合层硬度为 HRC 59.3; 王娟等^[12]采用铸渗法制备 ZTA (ZrO₂ 增韧 Al₂O₃) 增强铬铁基复合材料, 在 900℃ 高温下, 其抗磨损性能提高到 HCCI 基体的 4 倍左右; 蒋吉鹏等^[13]采用热压烧结法制备 TiC_p 增强 HCCI 复合材料, 当 TiC_p 质量分数为 21.5wt% 时, 复合材料的硬度和弯曲强度达最大值, 分别为 HRC 61.7 和 147MPa。上述复合材料的制备方法大多数以常规铸造工艺为基础, 增强相添加方式复杂^[14], 且增强的效果并不显著。热压烧结法

的生产率低、成本高, 且制得的复合材料的综合力学性能低^[15]。

GU 等^[16]和李忠涛等^[17]采用粉末冶金法制备了新型 HCCI, 相比铸造 HCCI, 其抗弯强度和冲击韧性都实现了成倍提高, 是一种很好的抗冲击磨粒磨损材料。且由于其内部已含有 30vol% 左右的 M₇C₃ 型含铬碳化物, 有望在陶瓷颗粒增强相加入不多的情况下, 达到低成本和高硬度/耐磨性的双重目标。

TiC 价格经济、显微硬度在陶瓷颗粒中较突出, 且具备比重小、摩擦系数小和与钢铁基体润湿性较好等特点^[18-19], 作为硬质相在钢结硬质合金中获得广泛应用, 但增强粉末冶金法制备 HCCI 复合材料的研究鲜有公开报导^[20-22]。本文采用液相烧结技术开展 TiC_p 增强 HCCI 复合材料的研制, 重点探索 TiC_p 添加量对复合材料烧结致密化、显微组织演变和力学性能的影响规律, 以期获得硬度和耐磨性媲美 WC 硬质合金的新型硬质材料。

1 实验材料与方法

1.1 原材料

实验选用 TiC 粉末和水雾化 HCCI 粉末作为原料粉末, 采用 BT-9300H 型激光粒度分布仪对原料粉末粒度特性进行检测, 得到 TiC 粉末平均粒径 D₅₀ 为 0.49 μm, 水雾化 HCCI 粉末 D₅₀ 为 56.43 μm。铸铁粉末含 C 量在碳硫分析仪 (CS600, 美国力可公司) 中测定, 其他合金元素在直读光谱仪 (OES, SPECTRO, 德国斯派克分析仪器公司) 中测定, 基本成分检测结果见表 1。

表 1 高铬铸铁 (HCCI) 粉末基本化学成分

Table 1 Basic chemical composition of high chromium cast iron (HCCI) powder

Element	C	Cr	Mn	Si	Fe
Content/wt%	2.67	15.40	0.63	0.77	Balance

1.2 实验流程与方案

图 1 为实验流程图。先将 TiC 粉末和高铬铸铁粉末在研磨钵中进行初混, 再将混好的粉末与钢球按照球料体积比为 1 : 1 的比例倒入钢罐中放在滚筒球磨机上以 $0.6N_{cr}(N_{cr}=42.4/\sqrt{D})$, 其中 D 为球磨罐的直径, 单位为 m。)的速度进行滚动球磨, 球磨时间为 15 h。将 TiC_p 的添加量分别选定质量分数为 10wt%、15wt%、20wt%、25wt% 和

30wt%, 以便研究添加量变化对显微组织和力学性能的影响规律。为使球磨混合粉末具有更好的压制性能, 在其中添加质量分数为 1wt% 的丁苯橡胶作为成型剂。最后在 SFSL 两柱液压机 (泰州市荣美液压机械制造有限公司) 上通过模具对筛分好的粉末开展双向压制成形, 压制压力为 300~400 MPa, 压坯的尺寸为 80 mm×17 mm×13 mm。

采用液相烧结技术进行复合材料的制备。在

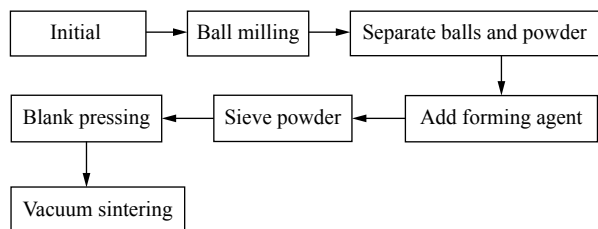


图1 实验流程图

Fig. 1 Experimental flowchart

SW8 型真空烧结炉(株洲盛元硬质合金设备制造有限公司)中进行, 烧结真空度保持在 10 Pa 左右, 保温时间统一为 90 min。通过改变烧结温度来研究坯样的致密化行为, 并优化出烧结工艺。

1.3 表征方法

采用阿基米德原理测量烧结试样的密度。用 Wilson RB2000 全自动洛氏硬度计(莱州华银试验仪器有限公司)检测试样的硬度, 每个样品测量 5 次后取平均值作为最终结果。烧结复合材料的抗弯强度和冲击韧性在 Instron3369 电子万能力学试验机(美国英斯特朗公司)和 XJ-40A 摆锤式冲击试验机(百检金&广海公司)上进行测试, 分别使用 5 mm×5 mm×35 mm 和 10 mm×10 mm×50 mm 无缺口标准试样, 分别取 3 次检测结果的平均值作为最终性能指标。利用 D8-advance 型 X 射线衍射仪(XRD, 布鲁克公司, Cu 靶, $\lambda=0.15405$ nm)分析试样的物相组成。使用 TESCAN MIRA3 LMU 场发射扫描电镜(TESCAN 公司)观察分析试样的显微组织和冲击断口。

2 结果与讨论

2.1 TiC_p /HCCI 复合材料烧结致密化行为

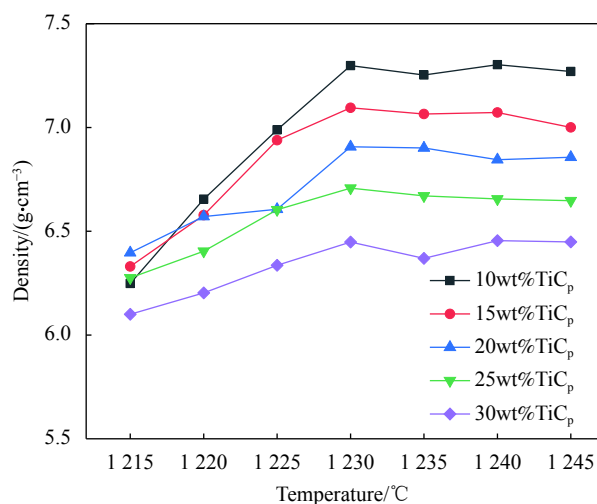
图 2 为实验获得的 TiC_p /HCCI 复合材料密度随烧结温度的变化曲线。图 3 为 TiC_p 质量分数为 15wt%、烧结温度分别为 1 240℃ 和 1 255℃ 的试样。可知, 各种成分烧结复合材料的密度均呈现随烧结温度提高先快速提高, 然后达到一稳定区间的变化规律。由于 TiC_p 的理论密度为 4.93 g/cm³, 本实验用 HCCI 的理论密度约为 7.94 g/cm³, 因此复合材料密度随 TiC_p 含量的增加而降低。由肖平安等^[23]对烧结 15Cr 系亚共晶高铬铸铁的研究可知, 未添加 TiC_p 的 15Cr 系亚共晶 HCCI 的优化烧结温度为 1 215℃, 而添加 TiC_p 后复合材料的优化烧结温度约为 1 230℃, 两者产生了 15℃ 左右的温差。这是由于随着烧结温度升高液相数量增加, TiC_p 作为硬质相分散在液相中阻碍了颗粒重排和元素

扩散, 只能通过升高温度产生更多的液相, 才能全致密化烧结。实验发现过高的烧结温度会使试样发生“坍塌”现象^[24], 此时样品密度会有略微的下降趋势, 且坍塌的样品无法保持压坯初始的形状, 无法在实际应用中满足生产要求。

表 2 为不同 TiC_p 添加量的 TiC_p /HCCI 复合材料经过 1 230℃×90 min 烧结后的相对密度。其中将 TiC_p 和 15Cr 系 HCCI 的理论密度分别选定为 4.93 g/cm³ 和 7.94 g/cm³, 相对密度计算公式为

$$\rho = \frac{1}{\frac{m_1}{\rho_1} + \frac{m_2}{\rho_2}} \quad (1)$$

式中, ρ_1 、 m_1 和 ρ_2 、 m_2 分别为 TiC_p 和 HCCI 的理论密度和对应的质量分数。由表 2 可知, TiC_p 添加量为 10wt%~20wt% 时复合材料在 1 230℃ 进

图2 TiC_p /HCCI 复合材料烧结试样密度随温度变化曲线Fig. 2 Effect of sintering temperature on the density of TiC_p /HCCI composites图3 TiC_p 质量分数为 15wt%、烧结温度分别为 1 240℃ 和 1 255℃ 的 TiC_p /HCCI 试样Fig. 3 TiC_p /HCCI samples with TiC_p mass fraction of 15wt% and sintering temperature of 1 240℃ and 1 255℃

行烧结能够达到全致密化(全致密化指相对密度≥97.5%),而后继续提高添加量,相对致密度开始逐步降低;这可能是由于TiC_p含量过多时,在烧结过程中形成的熔融金属液不足以保证充分渗入到TiC_p密集的区域,导致复合材料的孔隙度上升,

使相对密度下降。通过上文对TiC_p/HCCI复合材料致密度变化规律的研究得出,各个成分复合材料的烧结温度均应该控制为≥1 230℃。为此,我们将下文中各种成分复合材料的烧结温度统一为1 230℃。

表 2 烧结 TiC_p/HCCI 复合材料的相对密度
Table 2 Relative densities of sintered TiC_p/HCCI composites

TiC _p content/wt%	10	15	20	25	30
ρ ₁ /(g·cm ⁻³)	7.30	7.10	6.91	6.71	6.45
ρ ₂ /(g·cm ⁻³)	7.48	7.27	7.08	6.89	6.71
ρ/%	97.59	97.66	97.59	97.38	96.13

Notes: ρ₁—True density; ρ₂—Theoretical density; ρ—Relative density.

2.2 TiC_p/HCCI 复合材料相组成与显微组织

图 4 是不同 TiC_p 含量 TiC_p/HCCI 复合材料的 XRD 图谱。可知,虽然 TiC_p 添加量发生改变,但是 TiC_p/HCCI 复合材料的衍射图峰位不变,主要由马氏体、M₇C₃ 碳化物、TiC_p 碳化物及少量奥氏体组成。随着 TiC_p 含量增加,可看出不但 37°、42°和 61°左右的 TiC 峰明显增强,而且 65°与 82.5°左右的马氏体峰及 44°左右的马氏体和 M₇C₃ 碳化物复合峰也明显增强。说明提高 TiC_p 加入量有一定的促进马氏体和 M₇C₃ 碳化物形成的作用,有利于进一步提高复合材料的硬度。

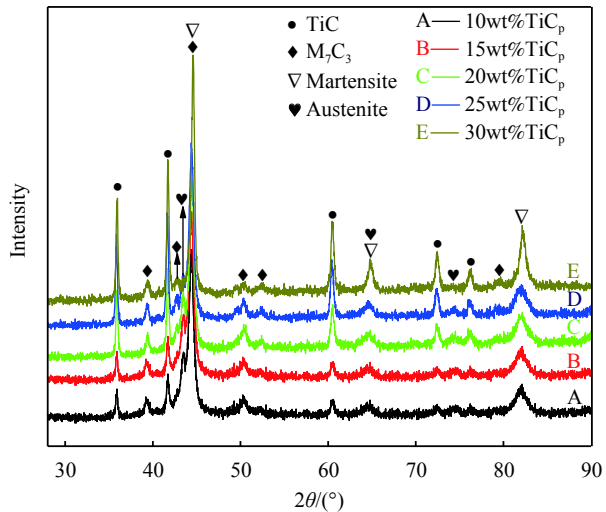


图 4 不同 TiC_p 含量 TiC_p/HCCI 复合材料的 XRD 图谱
Fig. 4 XRD patterns of TiC_p/HCCI composites with different TiC_p contents

图 5 为不同 TiC_p 含量的 TiC_p/HCCI 复合材料的 SEM 图像。可知,随 TiC_p 添加量的增多,在

复合材料中由于 TiC_p 沿晶界分布,形成的网状结构逐渐明显,将原本连续的基体分割成许多孤立的岛状物,TiC_p 颗粒的分布则由原来分散的不规则聚集团块逐步变成连片的网状结构。显然,TiC_p 网状结构的形成会对 M₇C₃ 碳化物的析出与生长及 TiC_p/HCCI 复合材料的强度与韧性产生重大影响。可以发现,随着 TiC_p 添加量的增多,岛状基体团块晶粒越来越小,析出了越来越多的 M₇C₃ 碳化物。

图 6 为 TiC_p 含量为 20wt% 时 TiC_p/HCCI 复合材料的 EDS 面扫描图像。可知,Ti 元素对应分布在图 6(a) 中的深灰色和黑色小圆点处,Cr 元素对应浅灰色区域,而 C 元素则分布在除 Fe 元素之外的深灰色和浅灰色两个区域的合并处,Fe 元素的富集区与 Ti 元素的富集区正好错开,Ti 元素的富集区也有少量的 Fe 元素。由图 4 可知,复合材料主要由马氏体、M₇C₃ 碳化物、TiC 碳化物及少量奥氏体组成。因此 Ti 和 C 两种元素富集的区域对应的是 TiC 相,即图 6(a) 中连成网状的深灰色区域和黑色小圆点对应的应该是 TiC 硬质相;Cr 元素和 C 元素富集的区域对应 M₇C₃ 碳化物相,即图 6(a) 中浅灰色区域对应是 M₇C₃ 碳化物;Fe 富集的区域对应马氏体和奥氏体,即图 6(a) 中白色区域对应马氏体相和奥氏体相。因此,印证了图 5 关于几个相的分布及变化推测。

2.3 TiC_p/HCCI 复合材料力学性能

图 7 为烧结态 TiC_p/HCCI 复合材料的硬度与冲击韧性随 TiC_p 添加量的变化曲线。可知,随 TiC_p 添加量的逐渐增多,硬度先逐步上升,到达 25wt% 时达到最大值 HRC 67.2,此时复合材料的

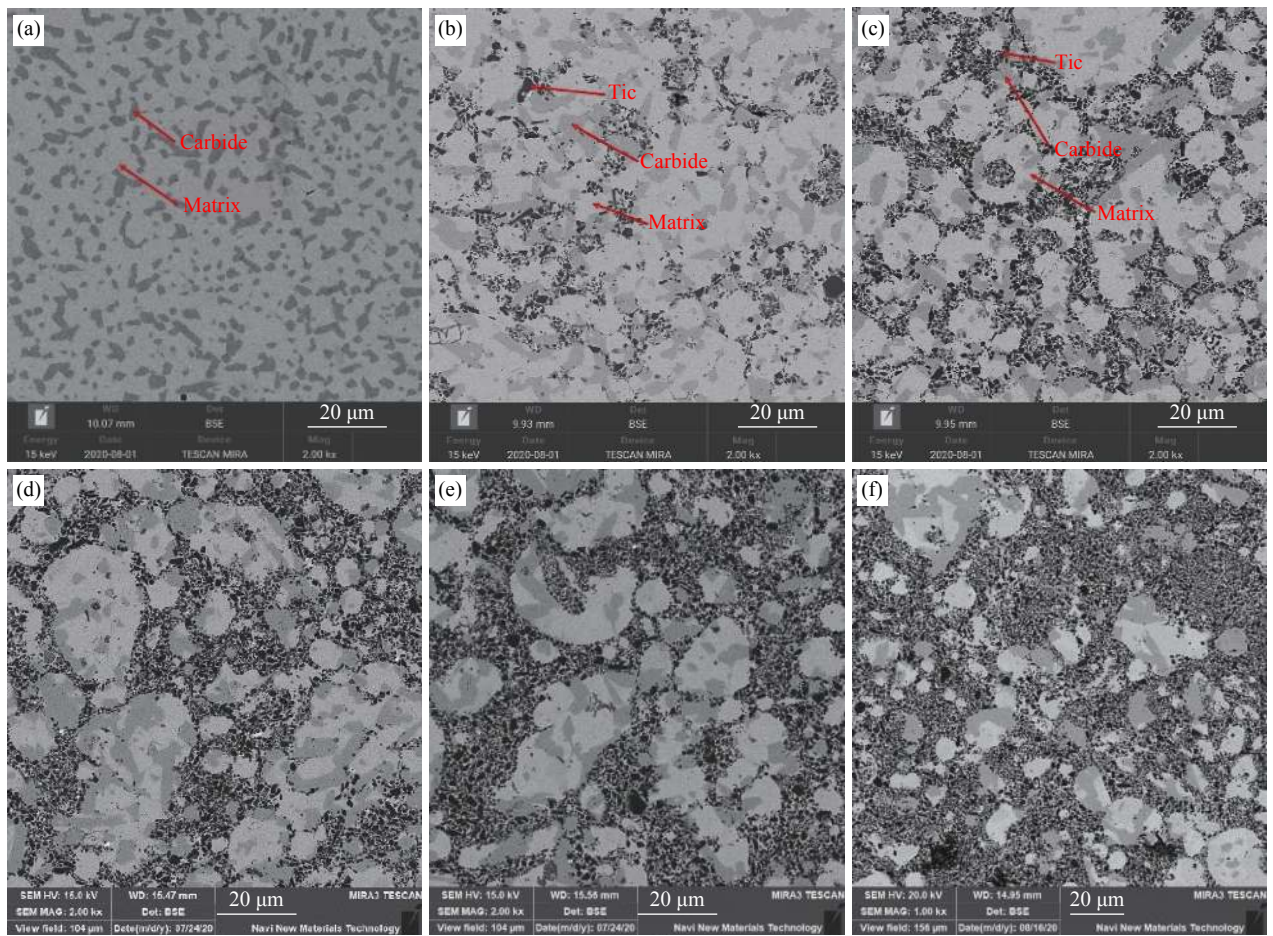


图 5 TiC_p/HCCI 复合材料的 SEM 图像

Fig. 5 SEM images of TiC_p/HCCI composites

((a) 0wt%; (b) 10wt%; (c) 15wt%; (d) 20wt%; (e) 25wt%; (f) 30wt%)

硬度相比较于不添加 TiC_p 的 HCCI 的硬度提高 12.8%；但是继续提高 TiC_p 添加量至 30wt% 时硬度反而急速下降。韧性随 TiC_p 含量的增加呈线性下降变化规律。硬度先上升是由于 TiC_p 加入后在复合材料中成为颗粒强化的硬质点，提高了复合材料抵抗外来硬质材料从表面侵入的能力；由 TiC_p/HCCI 复合材料的 XRD 图谱可知随 TiC_p 含量的增加，复合材料的马氏体、M₇C₃ 碳化物和硬质相 TiC 的峰值都增强，说明 TiC_p 的加入具有促进基体中 M₇C₃ 和马氏体的生成作用，而 M₇C₃、马氏体和 TiC 都属于强度与硬度高但韧性较差的相，这三种增强相数量的增多促使复合材料的整体硬度得到明显提升，韧性则发生线性下降。而在韧性一定的前提下，金属材料的耐磨性可以由材料的硬度来衡量，因此，只要保证复合材料的韧性和所要替代的硬质合金的韧性在一个数量级上，尽可能的提高复合材料的硬度，则很有可能得到最初预想的更低成本但性能可与某些硬质合金相

媲美的优质耐磨金属复合材料。当 TiC_p 添加量达到 30wt% 时硬度反而下降，这是由于复合材料的致密度不够，如表 2 所示，此时的相对致密度仅为 96.13%，材料中孔隙率增大，导致复合材料整体硬度下降。

图 8 为 TiC_p 含量对 TiC_p/HCCI 复合材料抗弯强度的影响。可知，材料的抗弯强度随 TiC_p 的增加而下降，在 TiC_p 添加量为 10wt%~20wt% 之间下降趋势相对比较平缓，当 TiC_p 添加量大于 20wt% 后呈急剧下降趋势。这主要是由于随 TiC_p 增多，高强度与硬度的脆性相与基体的体积比明显变大，原本均匀分散在 HCCI 基体中的 TiC_p 团块，随其含量的增多逐渐变成连续的网状，将基体分隔成孤岛，由原来的金属基体包围 TiC_p 团块演变成网状的硬质颗粒包围基体孤岛；故烧结制品的抗弯强度与冲击韧性总体呈现下降的趋势；先缓慢下降后快速下降说明在 15wt%~20wt% 的添加量之间存在 TiC_p 连续网状结构形成的临界添加量。

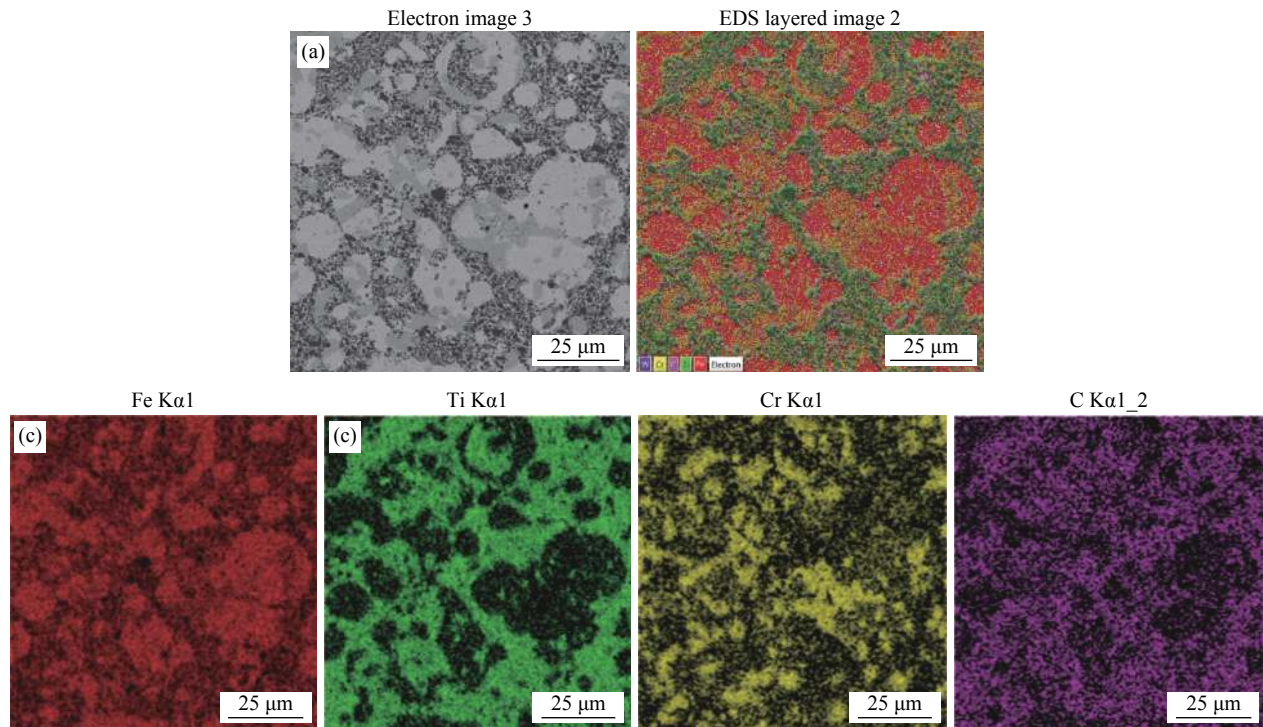


图 6 TiC_p 含量为 20wt% 的 TiC_p/HCCI 复合材料的 EDS 图象
Fig. 6 EDS images of TiC_p/HCCI composite with 20wt% TiC_p

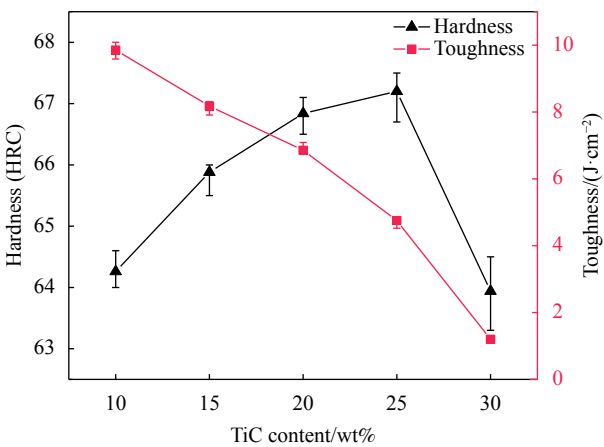


图 7 TiC_p 含量对 TiC_p/HCCI 复合材料硬度和冲切的影响
Fig. 7 Effect of TiC_p content on hardness and toughness of TiC_p/HCCI composites

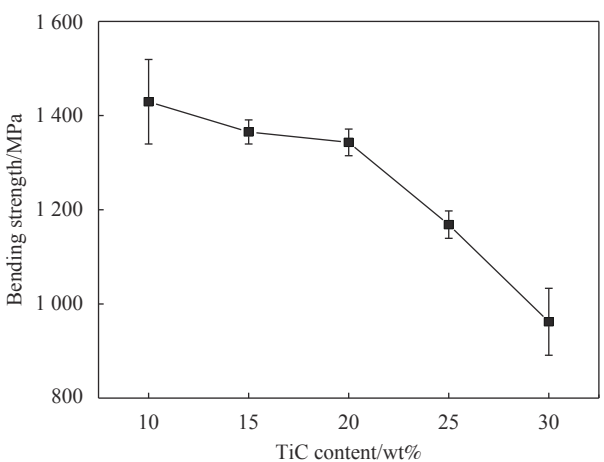


图 8 TiC_p 含量对 TiC_p/HCCI 复合材料弯曲强度的影响
Fig. 8 Effect of TiC_p content on bending strength of TiC_p/HCCI composites

3 TiC_p/HCCI 复合材料断口分析

图 9 为含 15wt% TiC_p 复合材料的抗弯强度试样断口 EDS 图谱。可以看出，尺寸较大的光滑表面 1 区域 Cr 含量和 Fe 含量较多，结合 XRD 结果分析，确定该区域应为复合材料的 M₇C₃ 碳化物的所处位置；尺寸较小呈圆形状的深色 2 区域 Ti 含量最高，为 TiC_p 富集区。颜色较深的圆形状 3 区域处 Ti 含量最多，Fe 和 Cr 的含量也偏多，可

能为 M₇C₃ 碳化物和 TiC_p 颗粒的交界处。
图 10 为不同 TiC_p 含量的 TiC_p/HCCI 复合材料的抗弯强度试样断口的 SEM 图像。可以看出，断口主要由解理面构成；图 10(a)、图 10(b) 和图 10(c) 显示，在 M₇C₃ 碳化物附近存在少量较深的韧窝，韧窝周围形成具有塑性变形的撕裂棱，并且随 TiC_p 含量的增多，解理面之间亮白色的撕裂棱数量减少；而图 10(d) 和图 10(e) 表明，在 TiC_p 富集

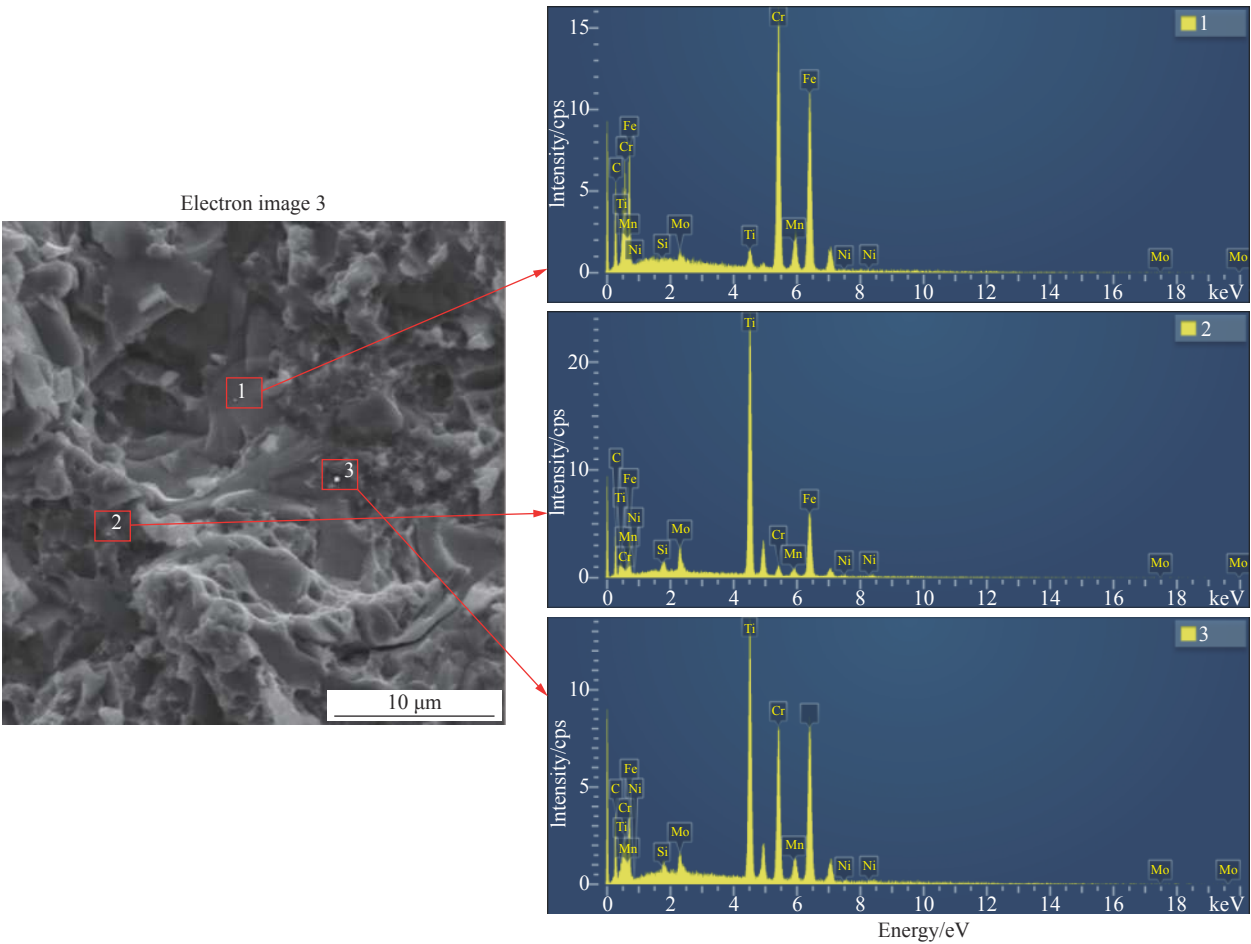
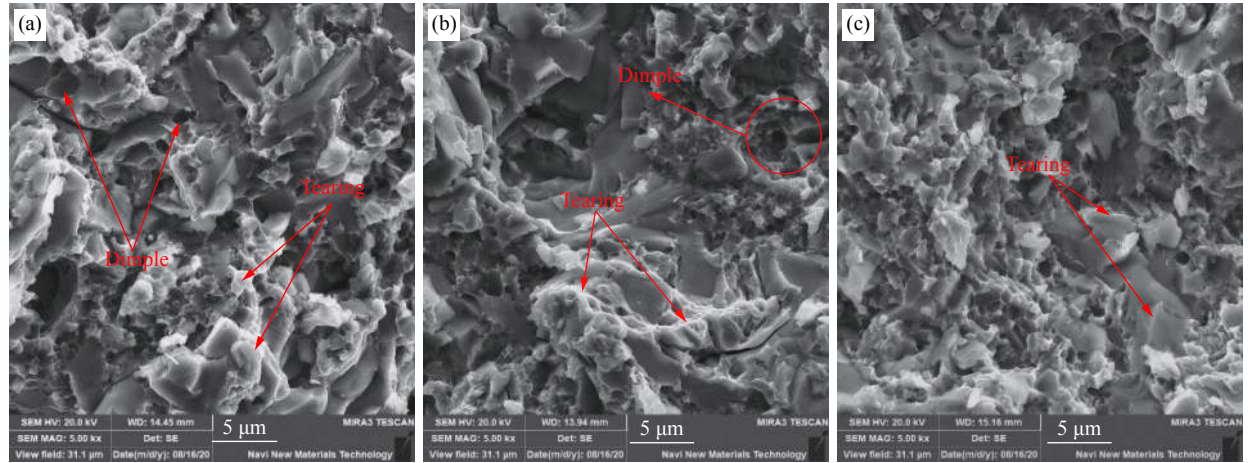


图9 含 15wt%TiC_p 的 TiC_p/HCCI 复合材料的 EDS 图谱

Fig.9 EDS spectra of TiC_p/HCCI composite with 15wt% TiC_p

的区域中主要为尺寸较细小的穿晶断裂，M₇C₃ 区域则表现为准解理断裂，但并未出现如图 10(a)、图 10(b) 和图 10(c) 中的韧窝断裂，因此断口类型应为由韧窝断裂、准解理断裂和穿晶断裂构成的混合断裂。解理断裂和穿晶断裂是典型的脆性断裂，韧窝断裂为韧性断裂的特征^[25]，因此材料宏

观性能表现为在 TiC_p 添加量为 10wt%~20wt% 时抗弯强度缓慢下降，而超过 20wt% 之后则出现急剧降低。根据以上分析，随着 TiC_p 含量的增多，复合材料的断口形貌由脆韧性混合断裂转变为脆性断裂，这种变化可能是 TiC 脆性相在显微组织中连续分布或 TiC_p 与金属基体的界面结合强度变差



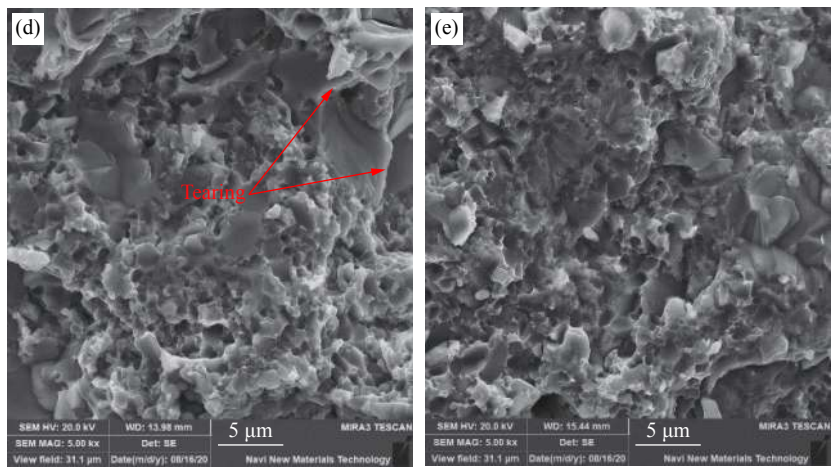


图 10 不同 TiC_p 含量的 TiC_p/HCCI 复合材料抗弯断口 SEM 图像

Fig. 10 SEM images of flexural fracture surface of TiC_p/HCCI composites with different TiC_p contents
(a) 10wt%; (b) 15wt%; (c) 20wt%; (d) 25wt%; (e) 30wt%)

造成的。

4 结论

(1)采用液相烧结技术成功制备了最高相对密度为 97.66% 的 TiC_p 增强高铬铸铁复合材料, 复合粉体具有良好的烧结性能。其构成相为 TiC、M₇C₃ 型碳化物、马氏体和少量奥氏体。

(2)随着 TiC_p 添加量增大, 相组成中的马氏体和 M₇C₃ 碳化物数量增多; 金属基体逐步呈孤岛状, 并在其中析出越来越多的 M₇C₃ 型碳化物, 同时 TiC_p 也逐步呈连续网状分布; 复合材料的整体硬度得到明显提升, 冲击韧性和抗弯强度则出现不同程度的下降。

(3)当 TiC_p 添加量为 20wt% 时烧结态 TiC_p 增强高铬铸铁复合材料具有最佳综合力学性能。此时硬度为 HRC 66.8, 冲击韧性为 6.86 J/cm², 抗弯强度为 1 343.10 MPa。当 TiC_p 添加量为 25wt% 时硬度达到最大值 HRC 67.20。

参考文献:

[1] 贾成厂, 孙兰. 工业的牙齿—硬质合金(1)[J]. 金属世界, 2011(4): 7-9.
JIA Chengchang, SUN Lan. Industrial teeth—Cemented carbide(1)[J]. Metal World, 2011(4): 7-9(in Chinese).
[2] 范安平, 肖平安, 李晨坤, 等. TiC基钢结硬质合金的研究现状[J]. 粉末冶金技术, 2013, 31(4): 298-303.
FAN Anping, XIAO Ping'an, LI Chenkun, et al. Research status of TiC-based steel-bonded cemented carbide[J]. Powder Metallurgy Technology, 2013, 31(4): 298-303(in

Chinese).

[3] 顾金宝, 高建, 时凯华, 等. 矿用WC-Co梯度硬质合金的制备及应用研究现状[J]. 稀有金属与硬质合金, 2019, 47(4): 83-88.
GU Jinbao, GAO Jian, SHI Kaihua, et al. Preparation and application research status of WC-Co gradient cemented carbide for mining[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2019, 47(4): 83-88(in Chinese).
[4] 魏世忠, 徐流杰. 钢铁耐磨材料研究进展[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 523-53.
WEI Shizhong, XU Liujie. Research progress of steel wear-resistant materials[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(4): 523-53(in Chinese).
[5] TABRETT C P, SARE I R, GHOMASHCHI M R. Microstructure-property relationships in high chromium white iron alloys[J]. International Materials Reviews, 1996, 41(2): 59-82.
[6] DOGAN O N, HAWK J A, LAIRD G. Solidification structure and abrasion resistance of high chromium white irons[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1997, 28(6): 1315-1327.
[7] HANLON D N, RAINFORTH W M, SELLARS C M. The effect of spray forming on the microstructure and properties of a high chromium white cast iron[J]. Journal of Materials Science, 1999, 34(10): 2291-2301.
[8] FILIPOVIC M, KAMBEROVIC Z, KORAC M, et al. Microstructure and me-chanical properties of Fe-Cr-C-Nb white cast irons[J]. Materials & Design, 2013, 47: 41-48.
[9] HUANG, Tian-xing, et al. Microstructure and wear properties of SiC woodceramics reinforced high-chromium cast iron[J]. Ceramics International, 2020, 46(3): 2592-2601.
[10] 刘相熠, 郑开宏, 罗铁钢, 等. 自生TiC铁基复合材料的三体磨

- 料磨损性能的工艺探究[J]. 铸造技术, 2018, 39(5): 976-979.
- LIU Xiangyi, ZHENG Kaihong, LUO Tiegang, et al. Process research on the three-body abrasive wear performance of in-situ TiC iron-based composites[J]. Foundry Technology, 2018, 39(5): 976-979(in Chinese).
- [11] 董晓蓉, 郑开宏, 王娟, 等. 铸造烧结法制备(Ti, W)C表面增强铁基复合材料[A]. 中国复合材料学会、杭州市人民政府. 第三届中国国际复合材料科技大会论文集[C]. 中国复合材料学会、杭州市人民政府: 中国复合材料学会, 2017: 7.
- DONG Xiaorong, ZHENG Kaihong, WANG Juan, et al. Preparation of (Ti, W)C surface-reinforced iron-based composites by casting and sintering method[A]. Chinese Society for Composite Materials, Hangzhou Municipal People's Government. The 3rd China International Composites Technology Conference Proceedings[C]. China Society for Composite Materials, Hangzhou Municipal People's Government: China Society for Composite Materials, 2017: 7(in Chinese).
- [12] 王娟, 郑开宏. ZTA颗粒增强铁基复合材料的高温磨料磨损性能研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(10): 101-105, 109.
- WANG Juan, ZHENG Kaihong. Research on high temperature abrasive wear performance of ZTA particle reinforced iron-based composites[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(10): 101-105, 109(in Chinese).
- [13] 姜吉鹏, 李世波, 胡树郡, 等. 添加TiC对高铬铸铁性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(2): 701-705.
- JIANG Jipeng, LI Shibo, HU Shujun, et al. The effect of adding TiC on the properties of high chromium cast iron[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(2): 701-705(in Chinese).
- [14] 周玉成, 魏世忠, 徐流杰, 等. Al_2O_3 颗粒增强钢铁基复合材料的研究进展[J]. 热加工工艺, 2010, 39(20): 87-90.
- ZHOU Yucheng, WEI Shizhong, XU Liujie, et al. Research progress of Al_2O_3 particle reinforced steel matrix composites[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(20): 87-90(in Chinese).
- [15] BOCANEGRA-BERNAL M H. Hot isostatic pressing (HIP) technology and its applications to metals and ceramics[J]. Journal of Materials Science, 2004, 39(21): 6399-6420.
- [16] GU J H, XIAO P G, SONG J Y, et al. Sintering of a hypoeutectic high chromium cast iron as well as its microstructure and properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 740: 485-491.
- [17] 李忠涛, 肖平安, 顾景洪, 等. 烧结Cr15高铬铸铁组织与性能的研究[J]. 材料科学与工艺, 2020, 28(01): 7-16.
- LI Zhongtao, XIAO Ping'an, GU Jinghong, et al. Research on the structure and properties of sintered Cr15 high chromium cast iron[J]. Materials Science and Technology, 2020, 28(01): 7-16(in Chinese).
- [18] LEON C A, DREW R A L. Preparation of nickel-coated powders as precursors to reinforce MMCs[J]. Journal of Materials Science, 2000, 35(19): 4763-4768.
- [19] OZBEN T, KILICKAP E, CAKIR O. Investigation of mechanical and machinability properties of SiC particle reinforced Al-MMC[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 198(1-3): 220-225.
- [20] 汝娟坚, 贺涵. 陶瓷增强钢铁基复合材料中基体与陶瓷的选择[J]. 科技创新与应用, 2019(17): 127-128.
- RU Juanjian, HE Han. The choice of matrix and ceramics in ceramic reinforced steel matrix composites[J]. Science and Technology Innovation and Application, 2019(17): 127-128(in Chinese).
- [21] 卢瑞青, 肖平安, 宋建勇, 等. 新型烧结高铬铸铁的冲击磨料磨损性能[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2018, 23(1): 70-77.
- LU Ruiqing, XIAO Ping'an, SONG Jianyong, et al. Impact abrasive wear resistance of a new type of sintered high chromium cast iron[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2018, 23(1): 70-77(in Chinese).
- [22] 郭继伟, 刘钦雷, 荣守范, 等. 碳化钛系钢结硬质合金的研究现状[J]. 铸造设备与工艺, 2010(1): 48-54.
- GUO Jiwei, LIU Qinlei, RONG Shoufan, et al. Research status of titanium carbide series steel-bonded cemented carbide[J]. Foundry Equipment and Technology, 2010(1): 48-54(in Chinese).
- [23] 肖平安, 肖璐琼, 顾景洪, 等. 15Cr系亚共晶高铬铸铁的烧结制备与性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(12): 58-64.
- XIAO Ping'an, XIAO Luqiong, GU Jinghong, et al. Sintering preparation and properties of 15Cr hypoeutectic high chromium cast iron[J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2019, 46(12): 58-64(in Chinese).
- [24] 周瑞. 粉末冶金M3: 2高速钢烧结行为及力学性能研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2008.
- ZHOU Rui. Research on sintering behavior and mechanical properties of powder metallurgy M3: 2 high speed steel[D]. Harbin Institute of Technology, 2008(in Chinese).
- [25] ZHANG X, SUN Y, NIU M, et al. Microstructure and mechanical behavior of in situ TiC reinforced Fe_3Al (Fe-23Al-3Cr) matrix composites by mechanical alloying and vacuum hot-pressing sintering technology[J]. Vacuum, 2020, 180: 109544.