

陶瓷颗粒增强扩散合金化钢复合材料的微观结构和力学性能

刘增林, 韩伟, 王彦康, 王涛, 吕伟龙

Microstructure and mechanical properties of diffusion alloyed steel composites reinforced by ceramic particles

LIU Zeng-lin, HAN Wei, WANG Yan-kang, WANG Tao, and L Wei-long

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2021120007>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

陶瓷颗粒增强粉末冶金Fe-2Cu-0.6C复合材料的微观结构和力学性能

Microstructure and mechanical properties of ceramic particle-reinforced powder metallurgy Fe-2Cu-0.6C composites
粉末冶金技术. 2019, 37(1): 11-17, 22

TiC_p颗粒增强高铬铸铁复合材料的显微组织和力学性能

Microstructure and mechanical properties of TiC particle enhanced high chromium iron
粉末冶金技术. 2021, 39(4): 319-325

气固反应原位生成TiC颗粒增强钛基复合材料

In-situ synthesized TiC particle-reinforced titanium matrix composites prepared by gas-solid reaction
粉末冶金技术. 2019, 37(3): 196-201

原位合成SiC对铝基复合材料微观组织和力学性能的影响

Effect of SiC on the microstructure and mechanical properties of aluminum matrix composites by *in-situ* synthesis
粉末冶金技术. 2020, 38(1): 42-50

粉末冶金法制备颗粒增强钛基复合材料的研究进展

Research progress on particle-reinforced titanium matrix composites prepared by powder metallurgy method
粉末冶金技术. 2020, 38(2): 150-158

HfN含量对ZrB₂基陶瓷材料微观组织和力学性能的影响

Effects of HfN content on microstructure and mechanical properties of ZrB₂-HfN ceramic materials
粉末冶金技术. 2019, 37(6): 416-421



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陶瓷颗粒增强扩散合金化钢复合材料的微观结构和力学性能

刘增林^{1)✉}, 韩伟¹⁾, 王彦康²⁾, 王涛²⁾, 吕伟龙²⁾

1) 钢铁研究总院, 北京 100081 2) 山东鲁银新材料科技有限公司, 济南 271104

✉通信作者, E-mail: lgliuzenglin@163.com

摘要 采用传统粉末冶金工艺制备了陶瓷颗粒增强 Fe-0.5Mo-1.75Ni-1.5Cu-0.7C 扩散合金化钢复合材料, 选用的陶瓷颗粒为 SiC、TiC 和 TiB₂。采用光学显微镜和扫描电子显微镜观察了烧结材料微观结构, 并对烧结材料的硬度、强度和摩擦磨损性能进行了测试。结果表明, 由于 SiC 和 TiB₂ 与基体的化学相容性好, 陶瓷颗粒与基体界面结合良好; 由于 TiC 颗粒具有极高的化学稳定性, TiC 颗粒与基体界面结合情况不理想。随着陶瓷相含量(质量分数)的增加, 添加 SiC 和 TiC 的烧结试样相对密度降低; 添加 TiB₂ 的烧结试样相对密度先增加后降低, 当添加 TiB₂ 质量分数为 0.9% 时达到最大值。随着陶瓷含量增加, 添加 SiC 和 TiB₂ 烧结试样的硬度增大, 当陶瓷相质量分数超过 1.2% 时, 硬度增加缓慢; 添加 TiC 烧结试样的硬度先增加后降低, 当添加 TiC 质量分数为 0.9% 时达到最大值。随着陶瓷相含量增加, 添加 SiC 和 TiC 烧结试样的强度降低, 少量添加 SiC 对强度没有明显损害; 添加 TiB₂ 烧结试样的强度先增加后降低, 当添加 TiB₂ 质量分数为 0.6% 时达到最大值(971.7MPa), 比基体提高了 14.1% 以上。添加陶瓷相对烧结钢性能的积极影响依次是 TiB₂、SiC 和 TiC。

关键词 颗粒增强; 扩散合金化钢复合材料; 微观结构; 力学性能

分类号 TF125

Microstructure and mechanical properties of diffusion alloyed steel composites reinforced by ceramic particles

LIU Zeng-lin^{1)✉}, HAN Wei¹⁾, WANG Yan-kang²⁾, WANG Tao²⁾, LÜ Wei-long²⁾

1) China Iron and Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China

2) Shandong Luyin New Material Technology Co., Ltd., Jinan 271104, China

✉Corresponding author, E-mail: lgliuzenglin@163.com

ABSTRACT The ceramic particle reinforced Fe-0.5Mo-1.75Ni-1.5Cu-0.7C diffusion alloyed steel composites were prepared by the conventional powder metallurgy techniques, using SiC, TiC, and TiB₂ as the reinforced ceramic particles, respectively. The microstructures of the sintered specimens were observed by the optical microscope and scanning electron microscope, and the hardness, tensile strength, and friction-wear performance were tested systematically. In the results, the interface bonding between the matrix and the ceramic particles is perfect due to the excellent chemical compatibility of SiC and TiB₂ with the matrix; the interface bonding

收稿日期: 2021-12-19

DOI: [10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2021120007](https://doi.org/10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2021120007); <http://pmt.ustb.edu.cn>

between the matrix and TiC particles is inferior because of the high chemical stability. The relative density of the sintered specimens reinforced by SiC and TiC decreases monotonously with the increase of the ceramic phase mass fraction; while the relative density of the sintered specimens reinforced by TiB₂ increases firstly and then decreases with the increase of TiB₂ mass fraction, and the relative density reaches the maximum value when the TiB₂ mass fraction is 0.9%. The hardness of the sintered specimens reinforced by SiC and TiB₂ increases monotonously with the increase of the ceramic phase mass fraction, and the increased rate becomes gently when the ceramic particle mass fraction exceeds 1.2%; the hardness of the sintered specimens reinforced by TiC increases firstly and then decreases with the increase of TiC mass fraction and reaches the maximum value when the TiC mass fraction is 0.9%. The tensile strength of the sintered specimens reinforced by SiC and TiC decreases monotonously with the increase of the ceramic particle mass fraction, a small amount of SiC addition has no visible impairment on the tensile strength; the tensile strength of the sintered specimens reinforced by TiB₂ increases firstly and then decreases and reaches the maximum value of 971.7 MPa when the TiB₂ mass fraction is 0.6%, which increases by over 14.1% compared with the matrix. The positive effect of the ceramic particles on the performance of the sintered specimens is TiB₂, SiC, TiC in turn.

KEY WORDS particle reinforcement; diffusion alloyed steel composites; microstructure; mechanical properties

粉末冶金是一种可以大批量、低成本制备近净成形、高性能、高尺寸精度零件的工艺技术,被广泛应用于生产汽车和机械工业零部件。但是,粉末冶金零件内部固有的孔隙影响了材料致密性和性能,使其性能与致密材料之间存在较大差距。提高粉末冶金零件性能的常用方法有提高材料密度、基体合金化、热处理及添加各种强化材料及增强颗粒,其中,在铁基粉末冶金材料中添加增强颗粒,可在保证基体材料性能的同时,充分发挥增强颗粒的优势,使烧结材料具有较高的强度及耐磨性,特别适合汽车和机械工业耐磨部件的加工制造,具有广阔的应用前景^[1-2]。目前颗粒增强铝基、镁基等金属基复合材料是研究热点并已经开始工业化应用,但颗粒增强铁基复合材料的生产工艺不够完善,没有形成规模化生产^[3-6]。

扩散合金化烧结钢是一种粉末冶金烧结硬化钢,具有优良的综合力学性能,在机械工程领域得到了广泛应用。随着工业技术的发展,各种机械及零件的极限工作环境愈加苛刻,对材料耐磨性要求持续提升。因此,在铁基粉末冶金材料中加入陶瓷颗粒,提高烧结材料的耐磨性,拓宽了扩散型粉末冶金烧结钢的应用范围,具有十分重要的研究和应用价值。

目前,常用的铁基复合材料增强相包括氧化物^[7]、碳化物^[8]、氮化物^[9]等。韩明明等^[10]用常规粉末冶金工艺制备 SiC 颗粒增强粉末冶金材料,显

著提高了材料的耐磨性和疲劳性能。种详远等^[11]和高前程等^[12]通过添加镀铜或镀镍的 SiC 颗粒,改善 SiC/Fe 之间的界面浸润性,提高复合材料的力学性能。郭远博^[13]将 TiB₂ 颗粒与铁基材料复合,制备出强度高、耐磨性好的颗粒增强复合材料。樊少忠等^[14]研究了原位反应合成制备 TiC 颗粒增强钢铁基复合材料,研究表明,陶瓷颗粒与基体材料界面结合良好,材料硬度高、耐磨性好。

本文以扩散型合金钢粉为基粉,加入 SiC、TiC、TiB₂ 等陶瓷颗粒,采用粉末冶金工艺制备了陶瓷颗粒增强的粉末冶金铁基复合材料,系统研究了陶瓷颗粒与基体界面的结合状态以及陶瓷相对烧结复合材料性能的影响规律。

1 实验材料及方法

1.1 实验原料

研究所用基粉是山东鲁银新材料科技有限公司生产的扩散型合金钢粉,粉末牌号是 LAP100.29D1,粉末化学成分见表 1。石墨粉的平均粒径 3.0 μm; 润滑剂为 E-203。所用 SiC、TiC、TiB₂ 三种陶瓷颗粒平均粒度为 3.0~5.0 μm。

1.2 试样制备

实验材料成分设计见表 2 所示。SiC、TiC、TiB₂ 三种陶瓷颗粒含量(质量分数)分别为 0%、0.3%、0.6%、0.9%、1.2%、1.5%。按照表 2 成分

表 1 LAP100.29D1 扩散型合金钢粉化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of the LAP100.29D1 diffusion alloyed steel powders

| C | Si | Mn | P | S | Ni | Mo | Cu | HL | % |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| 0.010 | 0.020 | 0.120 | 0.005 | 0.005 | 1.750 | 0.500 | 1.500 | 0.150 | |

称量粉末, 将原料粉末装入双锥 V 型混料机中混料 120 min, 为了充分混合均匀, 混料时加入少量钢球加速粉末混合均匀。混合粉末静置 24 h 后, 在 700 MPa 压力下单向压制成形实验的拉伸和冲击试样。将试样放入铺粉氧化镁的石墨舟中真空烧结 1140 °C, 保温 60 min, 然后随炉冷却。热处理工艺为烧结试样在气氛炉中加热至 850 °C, 保温 30 min, 浸油处理 25 min, 然后在箱式炉中 180 °C 回火 2 h。

表 2 陶瓷颗粒增强扩散合金钢成分组成 (质量分数)

| 陶瓷颗粒 (SiC、TiC、TiB ₂) | C | 润滑剂 | LAP100.29D1 | % |
|----------------------------------|-----|-----|-------------|---|
| 0、0.3、0.6、0.9、1.2、1.5 | 0.7 | 0.7 | 余量 | |

1.3 测试分析

采用阿基米德排水法测量生坯和烧结坯的密度, 并计算得到烧结坯的相对密度。分别使用 HR-150B 硬度计和 WDW-100 型万能材料试验机测量烧结态和热处理态试样的硬度和抗拉强度。利用 4XC-II 金相显微镜观察烧结试样的组织, 采用 EV010 扫描电镜 (scanning electron microscope, SEM) 观察陶瓷颗粒与基体界面结合状态, 并对试样摩擦

磨损表面进行分析。通过 M-2000A 摩擦磨损试验机测试材料的耐磨性, 加载压力 400 N, 持续 15 min, 对偶件转速为 400 r·min⁻¹。

2 结果与讨论

2.1 复合材料的烧结态金相分析

图 1 (a) 是基体 Fe-Mo-Ni-Cu-C 扩散合金化钢光学组织, 由于 Mo 元素为完全合金化状态, 决定了烧结钢的主要组织是珠光体 (P), 铁素体和渗碳体呈现片层状, 孔隙附近及靠近试样表面由于冷却速度较快出现贝氏体 (B), 铜金属附近冷却速度较快也容易出现贝氏体, 难以与珠光体具体分辨, 烧结材料具有较高的强度和硬度。添加陶瓷颗粒的光学组织见图 1 (b) ~ 图 1 (d), 烧结合金组织为珠光体、贝氏体, 陶瓷颗粒镶嵌于基体之中, 还有少量孔隙; 由于陶瓷颗粒的机械阻隔作用, 晶粒尺寸略有减小。图 1 (b) 与图 1 (a) 相比, 珠光体区域增多细化, 面积增大, 由于 Si/Fe 是热力学十分不稳定系统, 可在 800 °C 以上分解出石墨碳, 造成局部碳势升高, 珠光体发育充分, 珠光体含量增加并且尺寸细化。

2.2 复合材料的界面分析

图 2 是添加不同类型陶瓷颗粒的扩散合金化钢

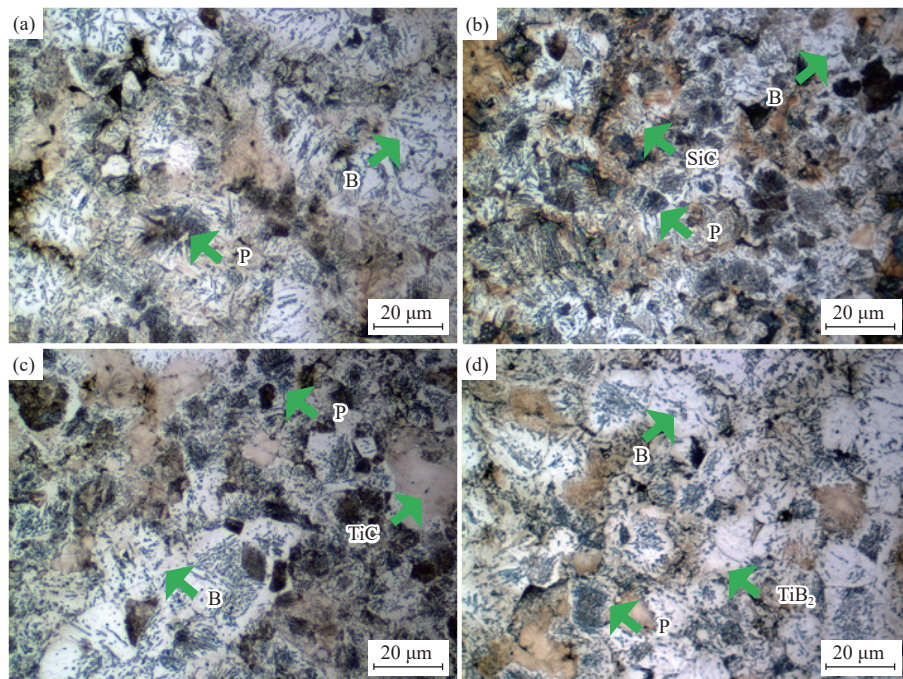


图 1 添加不同类型陶瓷颗粒的扩散合金化钢组织: (a) 基体; (b) SiC 0.9%; (c) TiC 0.9%; (d) TiB₂ 0.9%

Fig.1 Microstructure of the diffusion alloyed steels reinforced by the different types ceramic particles: (a) matrix; (b) SiC 0.9%; (c) TiC 0.9%; (d) TiB₂ 0.9%

断口的形貌，以观察陶瓷颗粒与铁基体的界面结合情况。从图2(a)看出，在SiC颗粒与铁基体界面结合良好，颗粒周围小区域存在孔隙。Tang等^[15]以SiC/Fe扩散偶作为研究对象，发现在800~1100℃下SiC/Fe界面发生反应，结合紧密。TiC增强复合

材料的界面结合见图2(b)，其中TiC颗粒与Fe在烧结过程中结合不紧密，没有形成良好结合^[16]。图2(c)为TiB₂颗粒增强复合材料显微形貌，可知Fe与TiB₂在烧结后界面结合良好。

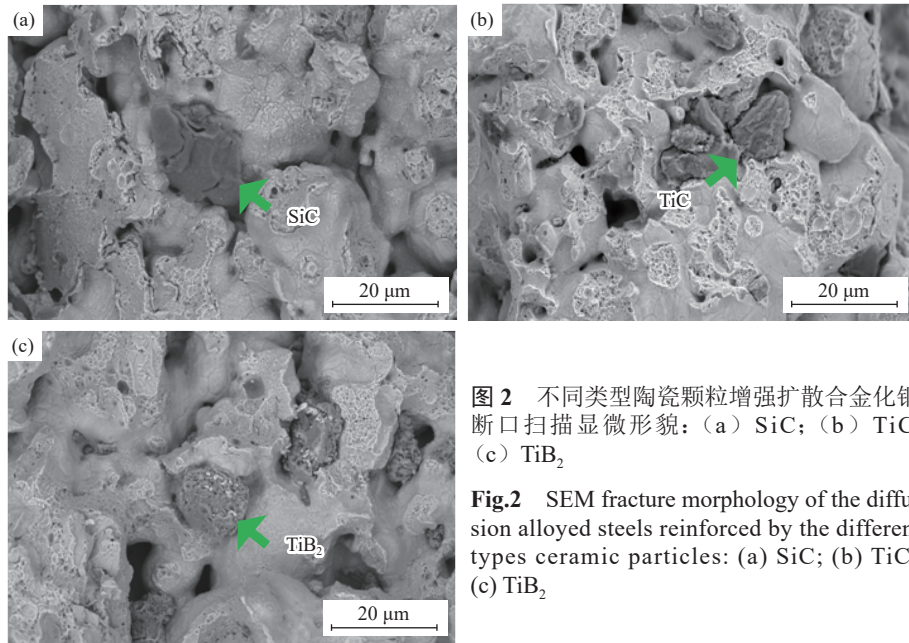


图2 不同类型陶瓷颗粒增强扩散合金化钢断口扫描显微形貌：(a) SiC；(b) TiC；(c) TiB₂

Fig.2 SEM fracture morphology of the diffusion alloyed steels reinforced by the different types ceramic particles: (a) SiC; (b) TiC; (c) TiB₂

2.3 复合材料的相对密度

图3显示了添加不同质量分数的陶瓷颗粒后，

铁基复合材料的生坯和烧结坯相对密度变化情况。图中表明，由于陶瓷材料密度低、硬度高，变形困

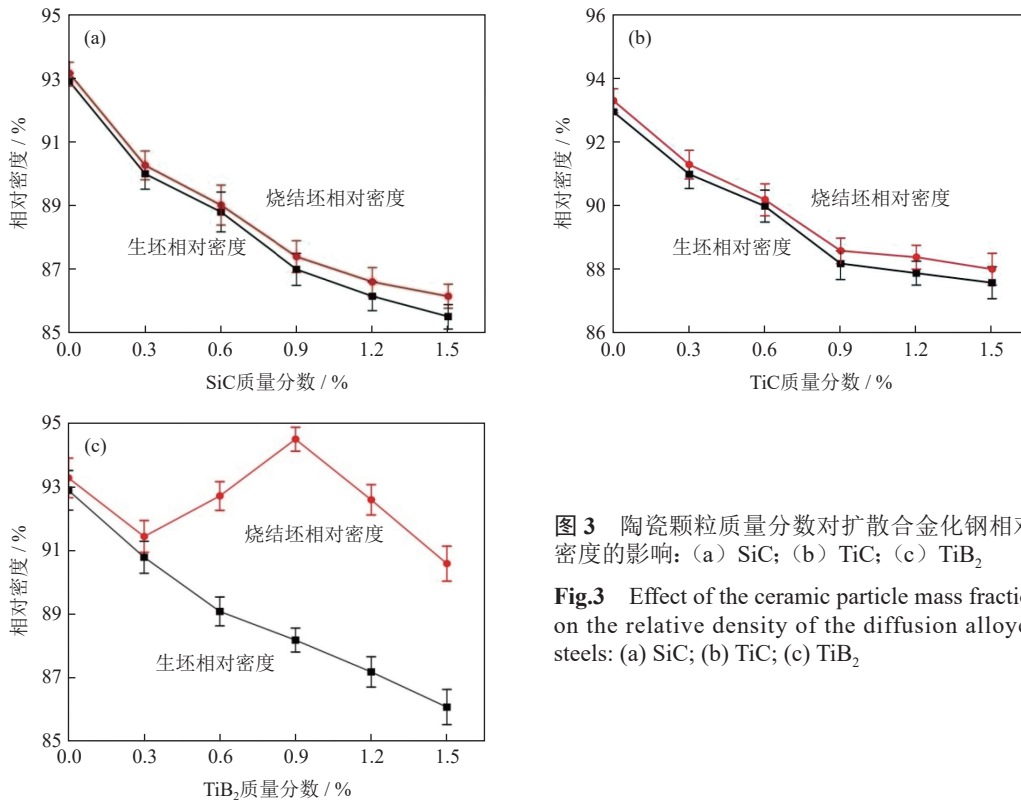


图3 陶瓷颗粒质量分数对扩散合金化钢相对密度的影响：(a) SiC；(b) TiC；(c) TiB₂

Fig.3 Effect of the ceramic particle mass fraction on the relative density of the diffusion alloyed steels: (a) SiC; (b) TiC; (c) TiB₂

难, 随着陶瓷颗粒质量分数增加, 生坯密度降低。当添加 SiC、TiC、TiB₂ 质量分数为 1.5% 时, 生坯相对密度与基体相比分别降低了 8.0%、5.9%、7.3%。

烧结钢中加入 SiC 或 TiC 陶瓷颗粒, 材料烧结坯相对密度降低, 添加 SiC、TiC 质量分数为 1.5% 时, 烧结坯相对密度与基体相比分别降低了 7.4%、5.4%。然而, 添加 TiB₂ 试样呈现出不同的变化趋势。当添加 TiB₂ 质量分数为 0.9% 时, 烧结坯相对密度达到最大值 94.5%, 与基体相比, 烧结坯相对密度提高了 1.6%, 其后, 随着 TiB₂ 质量分数由 0.9% 提高到 1.5%, 烧结坯相对密度与基体相比降低了 1.6%。主要原因是 TiB₂ 与铁发生反应, 分离出的 Ti 具有除氧去气、阻止钢晶粒长大等作用; B 元素与铁反应生成低熔点共晶体, 促进液相流动及烧结致密化, 特别是陶瓷颗粒尺寸细小, Ti、B 与 Fe 基体反应更显著, 对组织和性能影响更明显。如图 2 (a) 所示, SiC/Fe 界面处生成具有复杂结构的铁硅化物和碳的沉积物, 随着 SiC 陶瓷添加, 基体和陶瓷颗粒接触面增多, 割裂基体, 阻碍了烧结颈形成与长大, 烧结材料相对密度逐渐降低; 与之相比, 图 2 (b) 中 TiC 与基体结合不紧密。

2.4 复合材料的硬度

图 4 所示为添加不同类型陶瓷颗粒以及陶瓷颗粒质量分数对粉末冶金扩散合金化钢硬度的影响。由图可知, 添加 SiC 的烧结材料硬度随着 SiC 质量分数增加一直增大; 当 SiC 质量分数为 1.5% 时, 材料硬度达到最大值 (HRC 43.6), 与基体硬度 (HRC 34) 相比提高了 28.2%。在粉末冶金烧结钢中加入 SiC 后, 烧结试样硬度增大, 一方面是 SiC 的硬度远高于基体, 随着 SiC 含量增加, 体系中硬质点增多; 另一方面, SiC 分解的 C 扩散到基体中, 提高了基体的 C 含量, 改变了基体的组织。从图 4 中看出, 添加 TiC 颗粒的粉末冶金烧结钢的硬度增加幅度不大, 当 TiC 质量分数为 0.9% 时, 烧结钢的硬度增加至 HRC 39.6。这是因为 TiC 的硬度高于其他陶瓷, 也远远高于基体硬度, 但陶瓷颗粒与基体界面结合不理想, 烧结材料孔隙率高, 所以 TiC 颗粒增强效果不佳。由图可知, 添加 1.5%TiB₂ 的粉末冶金烧结钢硬度比基体提高了 34.4%, 在三种陶瓷颗粒增强材料中提高幅度最大。添加 TiB₂ 的粉末冶金烧结钢硬度提高主要原因是 TiB₂ 与基体界面结合良好, 烧结时分解出 Ti 元素和 B 元素, 能够脱氧, 活化表面, 促进烧结。随着陶瓷颗粒含量继续增加, 烧结钢硬度增加幅度放缓, 甚至降低,

说明陶瓷颗粒增强粉末冶金烧结钢应限制陶瓷含量, 否则会导致硬度降低。

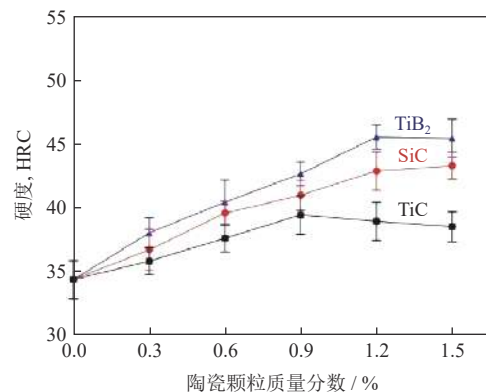


图 4 陶瓷颗粒质量分数对颗粒强化扩散合金化钢硬度的影响
Fig.4 Effect of the ceramic particle mass fraction on the hardness of the diffusion alloyed steels

2.5 复合材料的抗拉强度

图 5 是陶瓷颗粒增强粉末冶金烧结钢的抗拉强度。从图 5 可以看出, 当 SiC 质量分数为 0.3% 时, 烧结钢的强度与基体强度接近, 并没有降低, 是由于基体中含有 Ni、Mo、Cu 合金元素, 改善了基体对陶瓷颗粒的支撑强度。当 SiC 质量分数为 1.5% 时, 烧结钢的强度从 852 MPa 下降到 638 MPa, 降低幅度为 25.1%。由图可知, 添加 TiC 的粉末冶金烧结钢强度随着陶瓷相含量增加一直降低, 原因是 TiC 颗粒在烧结温度下不与基体反应, 与基体界面处存在间隙, 结合强度低, 在外力作用下, 界面处间隙容易形成裂纹源, 导致材料提前失效。图 5 表明, 添加 TiB₂ 陶瓷颗粒时, 烧结钢的抗拉强度先增加后降低, TiB₂ 质量分数为 0.6% 时, 抗拉强度达到最大值 (971.7 MPa), 与基体强度相比提

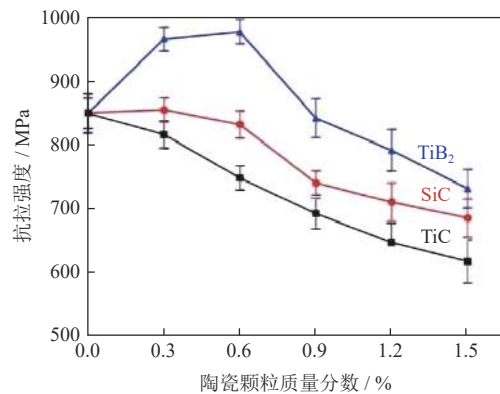


图 5 陶瓷颗粒质量分数对扩散合金化钢抗拉强度的影响
Fig.5 Effect of the ceramic particle mass fraction on the tensile strength of the diffusion alloyed steels

高了 14.1%；TiB₂ 质量分数为 1.5% 时，抗拉强度为 713.6 MPa，比基体降低了 16.3%。这说明，在三种陶瓷颗粒中，TiB₂ 对低合金粉末冶金烧结钢的强度提高最显著，这是由于 TiB₂ 与 Fe 反应可优化界面，TiB₂ 分解的 Ti 和 B 可促进烧结。

2.6 复合材料的断口

图 6 是不同类型陶瓷颗粒增强粉末冶金烧结钢冲击断口形貌观察。图 6 (a) 是基体断口形貌，材料的断裂模式主要为沿晶断裂（图中黄色箭头所示）和少量穿晶断裂（图中红色箭头所示）的复合模式，其中包含有少量的韧窝和孔隙。图 (b) 中

浅红色箭头所指颗粒为 TiC，由于其化学稳定性高，很难与铁粉颗粒形成有效的界面结合，沿晶断裂是这种材料的主要断裂模式。图 6 (c) 是 SiC 颗粒增强粉末冶金烧结钢的断口形貌，断口主要为沿晶断裂。图中浅红色箭头所指为 SiC 颗粒，SiC 颗粒与周围铁粉颗粒的结合程度尚可。图 6 (d) 中的浅红色箭头所指为 TiB₂ 颗粒，由于 TiB₂ 与铁粉颗粒的相容性好，界面结合紧密，提高了材料的强韧性，这与 TiB₂ 颗粒增强复合材料具有较高的拉伸强度试验结果相符，TiB₂ 颗粒增强复合材料的断口形貌主要是沿晶断裂。

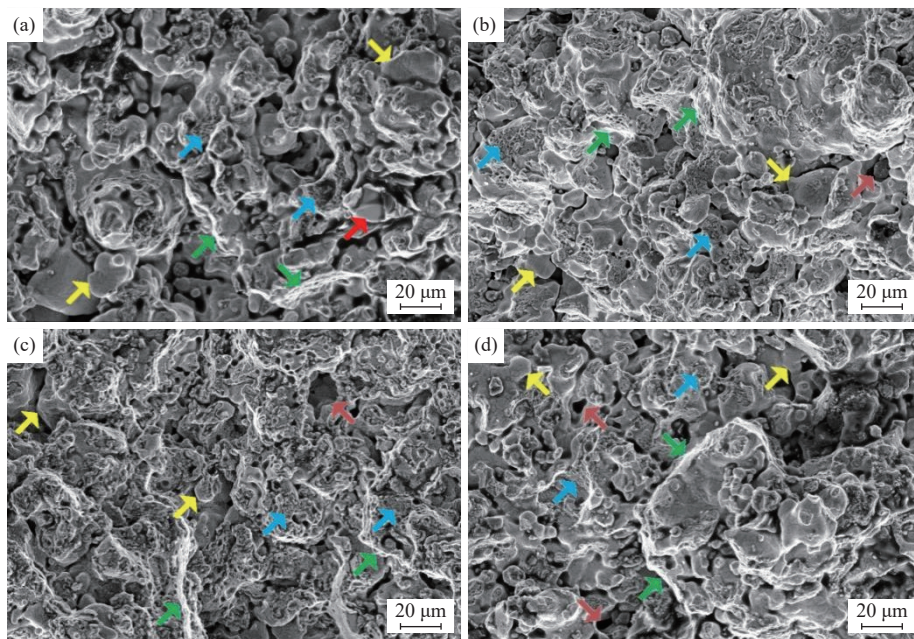


图 6 不同类型陶瓷颗粒增强扩散合金化钢断口形貌：(a) 基体；(b) TiC 0.9%；(c) SiC 0.9%；(d) TiB₂ 0.9%

Fig.6 Fracture morphology of the diffusion alloyed steels reinforced by the different types ceramic particles: (a) matrix; (b) TiC 0.9%; (c) SiC 0.9%; (d) TiB₂ 0.9%

2.7 复合材料的耐磨性

考虑到试样在实际使用中的情况及干摩擦磨损量往往大于润滑条件下的摩擦磨损量，故本试验测量试样干摩擦条件下材料的摩擦性能。因三种陶瓷中 TiC 颗粒对复合材料的力学性能提高不明显，故没有测定 TiC 颗粒增强复合材料的摩擦性能。在

M-2000A 摩擦磨损试验机上测试了材料的耐磨性，加载压力为 400 N，试验过程持续 15 min，转速为 400 r·min⁻¹，实验温度 25 °C，试样规格是 30 mm×6 mm×7 mm，对偶件摩擦副材料 Cr12MoV，硬度 HRC 52~55 烧结钢的摩擦磨损减重结果见表 3。

图 7 是烧结钢摩擦磨损后表面形貌。本实验施

表 3 陶瓷颗粒增强扩散合金化钢摩擦磨损减重（质量分数）

Table 3 Weight lost of the ceramic particles reinforced diffusion alloyed steels

| 增强颗粒 | 磨损量 / mg | % |
|-------------------------|----------|---|
| 不添加增强颗粒 | 5.9±0.18 | |
| SiC (0.9%) | 4.0±0.16 | |
| TiB ₂ (0.9%) | 3.6±0.11 | |

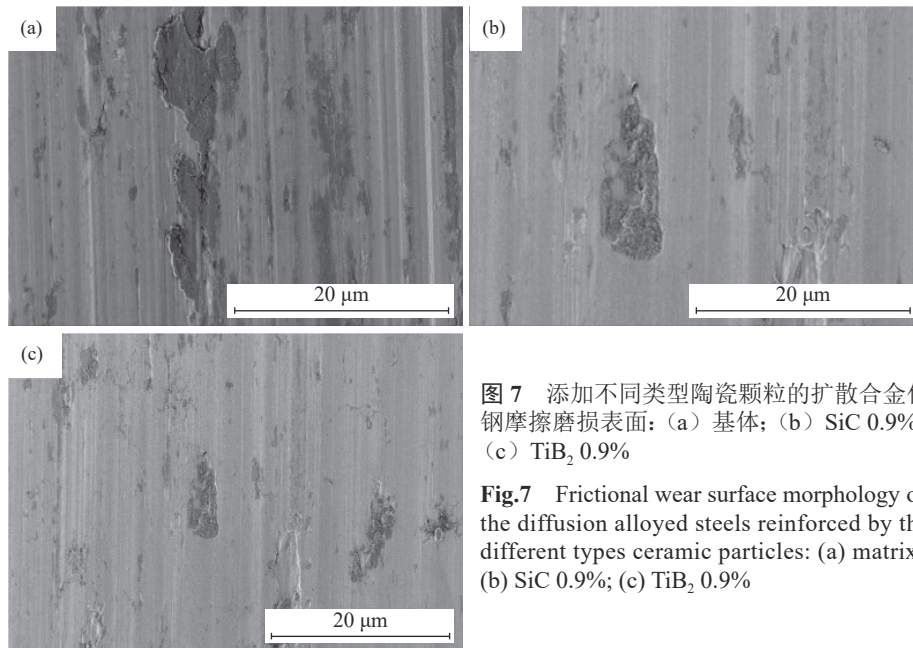


图 7 添加不同类型陶瓷颗粒的扩散合金化钢摩擦磨损表面: (a) 基体; (b) SiC 0.9%; (c) TiB₂ 0.9%

Fig.7 Frictional wear surface morphology of the diffusion alloyed steels reinforced by the different types ceramic particles: (a) matrix; (b) SiC 0.9%; (c) TiB₂ 0.9%

加载荷为 400 N, 与摩擦接触面积相比, 单位面积承载高, 属于高接触应力的摩擦磨损。在此情况下, 烧结钢的首要磨损机制是磨料磨损, 其次是粘着磨损并伴随氧化磨损; 磨损面表面有犁沟状磨痕, 局部有块状块体剥落。如图所示, 图 7 (a) 存在明显的划痕和犁沟, 有大块状块体剥落, 图 7 (b) 和图 7 (c) 由于添加陶瓷颗粒, 复合材料的硬度提高, 陶瓷颗粒优先起到承载的作用, 提高了材料的耐磨性能, 磨损量小。

3 结论

(1) 对于添加 SiC 和 TiC 陶瓷颗粒的扩散合金化钢, 随着陶瓷颗粒质量分数的增加, 无论是生坯密度还是烧结相对密度均降低; 对于 TiB₂ 陶瓷颗粒增强的粉末冶金烧结钢, 随着陶瓷相质量分数增加, 生坯密度一直降低, 烧结相对密度变化大, 在添加 TiB₂ 质量分数为 0.9% 时达到最大值, 相对密度为 94.5%。

(2) 添加 SiC 和 TiB₂ 颗粒增强扩散合金化钢的陶瓷颗粒与基体界面结合良好, 当添加陶瓷相质量分数为 1.5% 时, 烧结钢硬度比基体分别提高了 28.2%、34.4%; 添加 TiC 颗粒的烧结钢陶瓷颗粒与基体结合不紧密, 硬度无明显变化。

(3) 随着陶瓷相质量分数增加, 添加 SiC 和 TiC 的烧结材料强度降低, 基体中含有 Ni、Mo、Cu 合金元素, 降低 Fe 和 SiC 陶瓷颗粒的接触机会, 改善了基体对陶瓷材料的支撑强度, 当添加 SiC 质

量分数 0.3% 时, 烧结钢强度与基体接近; 添加 TiB₂ 的烧结材料强度先增加后降低。

(4) 对于高负载条件下的颗粒增强扩散合金化钢的磨损机制, 磨粒磨损是主要机制, 其次是粘着磨损和氧化磨损, 磨损过程陶瓷颗粒起到了优先承载作用, 提高了烧结钢的耐磨性能。在一定范围内, 烧结钢的耐磨性随着陶瓷质量分数的增加而提高。

参考文献

- [1] Ye X, Tu H J, Qiu Z W, et al. Effect of WC content on pore morphology and properties of Fe-1.5Cu-1.8Ni-0.5Mo-1C powder metallurgy composites. *Hot Working Technol*, 2019, 48(22): 89 (叶璇, 涂华锦, 邱志文, 等. WC 含量对 Fe-1.5Cu-1.8Ni-0.5Mo-1C 粉末冶金复合材料的孔隙形貌与性能的影响. *热加工工艺*, 2019, 48(22): 89)
- [2] Ru J J, He H. Preparation methods and research progress of ceramic particle reinforced metal matrix composites. *Technol Innov Appl*, 2019, 19(2): 116 (汝娟娟, 贺函. 陶瓷颗粒增强金属基复合材料的制备方法及其研究进展. *科技创新与应用*, 2019, 19(2): 116)
- [3] Pang Y D. *Preparation and Properties of TiC/NbC Ceramic Reinforced Fe Matrix Composites* [Dissertation]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2020 (庞雅丹. TiC/NbC 陶瓷颗粒增强 Fe 基复合材料的制备及工艺研究[学位论文]. 包头: 内蒙古科技大学, 2020)
- [4] Cao J X, Jin J F, Cao J H, et al. Wear resistance of iron matrix composites reinforced by mixed-type particles. *J Mater Eng*, 2017, 45(8): 62 (曹建新, 金剑锋, 曹敬祎, 等. 不同类型颗粒混合增强铁基复合材料的磨损性能. *材料工程*, 2017, 45(8): 62)
- [5] Zhuang W B, Han M M, Liu J F, et al. Research progress of ceramic particle reinforced iron matrix composites. *Hot Working Technol*, 2018, 47(4): 40

- (庄伟斌, 韩明明, 刘敬福, 等. 陶瓷颗粒增强铁基复合材料的研究进展. *热加工工艺*, 2018, 47(4): 40)
- [6] Tan A S. *Research on Mechanical and Tribological Properties of Aluminium Matrix Composites Reinforced with Hybrid SiC Microparticles and TiB₂ Nanoparticles* [Dissertation]. Changsha: Hunan University, 2017
(谭傲霜. SiC/TiB₂颗粒颗粒混杂增强铝基复合材料力学及摩擦磨损性能研究[学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2017)
- [7] Deirmina F, Pellizzari M. Production and characterization of a tool steel-PSZ composite by mechanical alloying and spark plasma sintering. *J Alloys Compd*, 2017, 709: 742
- [8] Guan D D. *Preparation and Properties of Ceramic Particle Reinforced 316L Stainless Steel Matrix Composites by Powder Metallurgy* [Dissertation]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2018
(管丹丹. 粉末冶金法制备陶瓷颗粒增强316L不锈钢基复合材料及其性能[学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2018)
- [9] Kumar A, Banerjee M K, Pandel U. Development of a novel MWCNT reinforced iron matrix nanocomposite through powder metallurgy route. *Powder Technol*, 2018, 331: 41
- [10] Han M M, Liu J F, Zhuang W B, et al. Study on thermal fatigue properties of SiC_p/Fe composites. *Hot Working Technol*, 2019, 48(16): 89
(韩明明, 刘敬福, 庄伟彬, 等. SiC_p/Fe复合材料的热疲劳性能研究. *热加工工艺*, 2019, 48(16): 89)
- [11] Zhong X Y, Zhen M H, Qiu Y, et al. Electroless copper plating on α -SiC powder and its effect on the properties of α -SiC/Fe composites. *Surf Technol*, 2018, 47(3): 244
(种详远, 甄明晖, 仇溢, 等. α -SiC粉体化学镀铜及其对铁基复合材料性能的影响. *表面技术*, 2018, 47(3): 244)
- [12] Gao Q C, Dai Q F, Wang B B, et al. Effect of Ni-coated SiC particles on mechanical properties of SiC(Ni)/Fe composite. *Adv Ceram*, 2017, 38(2): 108
(高前程, 代巧飞, 王彬彬, 等. Ni包裹SiC对SiC(Ni)/Fe复合材料性能的影响. *现代技术陶瓷*, 2017, 38(2): 108)
- [13] Guo Y B. *Study on Mechanical Properties and Dry Friction and Wear Behavior of TiB₂ Particle Reinforced Iron Matrix Composites* [Dissertation]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018
(郭远博. 硼化钛颗粒增强铁基复合材料的力学性能及干摩擦磨损行为研究[学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2018)
- [14] Fan S Z, Zhong L S, Cheng S L, et al. Research status of *in-situ* titanium carbide particle reinforced steel matrix composite. *Hot Working Technol*, 2015, 44(10): 16
(樊少忠, 钟黎声, 程仕李, 等. 原位制备碳化钛颗粒增强钢铁基复合材料研究现状. *热加工工艺*, 2015, 44(10): 16)
- [15] Tang W M, Zheng Z X, Ding H F, et al. A study of solid state reaction between silicon carbide and iron. *Mater Chem Phys*, 2002, 74(3): 258
- [16] He Q Q, Li P M, Yuan Y, et al. Microstructure and mechanical properties of ceramic particle reinforced powder metallurgy Fe-2Cu-0.6C composites. *Powder Metall Technol*, 2019, 37(1): 11
(何勤求, 李普明, 袁勇, 等. 陶瓷颗粒增强粉末冶金Fe-2Cu-0.6C复合材料的微观结构和力学性能. *粉末冶金技术*, 2019, 37(1): 11)

(上接第 526 页)

- [27] Hu L, Wang W, He Q, et al. Preparation and characterization of reduced graphene oxide-reinforced boron carbide ceramics by self-assembly polymerization and spark plasma sintering. *J Eur Ceram Soc*, 2020, 40(3): 612
- [28] Moshtaghioun B M, Ortiz A L, Gómez-García D, et al. Toughening of super-hard ultra-fine grained B₄C densified by spark-plasma sintering via SiC addition. *J Eur Ceram Soc*, 2013, 33(8): 1395
- [29] Ye F, Hou Z, Zhang H, et al. Densification and mechanical properties of spark plasma sintered B₄C with Si as a sintering aid. *J Am Ceram Soc*, 2010, 93(10): 2956
- [30] Rehman S S, Ji W, Khan S A, et al. Microstructure and mechanical properties of B₄C densified by spark plasma sintering with Si as a sintering aid. *Ceram Int*, 2015, 41(1): 1903
- [31] Ma L, Xie K Y, Toksoy M F, et al. The effect of Si on the microstructure and mechanical properties of spark plasma sintered boron carbide. *Mater Charact*, 2017, 134: 274
- [32] Rehman S S, Ji W, Khan S A, et al. Microstructure and mechanical properties of B₄C based ceramics with Fe₃Al as sintering aid by spark plasma sintering. *J Eur Ceram Soc*, 2014, 34(10): 2169
- [33] Zhang M, Li R, Yuan T, et al. Effect of low-melting-point sintering aid on densification mechanisms of boron carbide during spark plasma sintering. *Scr Mater*, 2019, 163: 34
- [34] Ji W, Todd R I, Wang W, et al. Transient liquid phase spark plasma sintering of B₄C-based ceramics using Ti-Al intermetallics as sintering aid. *J Eur Ceram Soc*, 2016, 36(10): 2419
- [35] Ortiz A L, Galán C A, Borrero-López O, et al. Highly sliding-wear resistant B₄C composites fabricated by spark-plasma sintering with Ti-Al additives. *Scr Mater*, 2020, 177: 91
- [36] Buyuk B, Tugrul A B, Cengiz M, et al. Radiation shielding properties of spark plasma sintered boron carbide-aluminium composites. *Acta Phys Pol A*, 2015, 128(2B): B
- [37] Liu Y, Li Z, Peng Y, et al. Effect of sintering temperature and TiB₂ content on the grain size of B₄C-TiB₂ composites. *Mater Today Commun*, 2020, 23(1): 100875
- [38] Liu Y, Wu X, Liu M, et al. Microstructure and mechanical properties of B₄C-TiB₂-SiC composites fabricated by spark plasma sintering. *Cerami Int*, 2020, 46(3): 3793
- [39] Sun J, Niu B, Ren L, et al. Densification and mechanical properties of boron carbide prepared via spark plasma sintering with cubic boron nitride as an additive. *J Eur Ceram Soc*, 2020, 40(4): 1103
- [40] Sahin F C, Apak B, Akin I, et al. Spark plasma sintering of B₄C-SiC composites. *Solid State Sci*, 2012, 14(11-12): 1660
- [41] Firshtman N, Kalabukhov S, Frage N. Effect of boron carbide composition on its densification behavior during spark plasma sintering (SPS). *Ceram Int*, 2018, 44(17): 21842
- [42] Zhang F, Fu Z Y, Zhang J Y, et al. Fast densification of B₄C ceramics with Al₂O₃ as a sintering aid by spark plasma sintering. *Mater Sci Forum*, 2009, 620-622: 395
- [43] Xie K Y, Toksoy M F, Kuwelkar K, et al. Effect of alumina on the structure and mechanical properties of spark plasma sintered boron carbide. *J Am Ceram Soc*, 2014, 97(11): 3710
- [44] Song Q, Zhang Z H, Hua Z Y, et al. Microstructure and mechanical properties of super-hard B₄C ceramic fabricated by spark plasma sintering with (Ti₃SiC₂+Si) as sintering aid. *Ceram Int*, 2019, 45(7): 8790
- [45] Yin S P, Zhang Z H, Cheng X W, et al. Spark plasma sintering of B₄C-TiB₂-SiC composite ceramics using B₄C, Ti₃SiC₂ and Si as starting materials. *Ceram Int*, 2018, 44(17): 21626