

粉末烧结法和铸造法制备 ZrO_2 增韧 Al_2O_3 陶瓷颗粒增强高铬铸铁基复合材料及其耐磨性能

高颖超 孙书刚 钱兵 汪兴兴 吕帅帅 朱昱 倪红军

Preparation and wear resistance of ZrO_2 toughened Al_2O_3 ceramic particles reinforced high chromium cast iron matrix composites by powder sintering and casting

GAO Yingchao, SUN Shugang, QIAN Bing, WANG Xingxing, LV Shuaishuai, ZHU Yu, NI Hongjun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201019.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[TiC_p/Cr15高铬铸铁复合材料的制备与性能](#)

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

复合材料学报. 2021, 38(9): 2964–2972 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201119.001>

[\$\text{ZrO}_2\$ 增韧 \$\text{Al}_2\text{O}_3\$ 颗粒增强Fe45复合材料拉伸断裂的有限元-离散元耦合方法仿真](#)

Tensile fracture simulation of ZrO_2 toughened Al_2O_3 particle/Fe45 composite based on finite–discrete element method

复合材料学报. 2019, 36(6): 1471–1479 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180906.002>

[球磨-转喷微注法制备纳米 \$\text{Al}_2\text{O}_3\$ 颗粒/Al\(7075\)复合材料的组织及磨损特性](#)

Microstructure and wear properties of nano- Al_2O_3 /Al(7075) composites fabricated by ball milling–spray–stirring process

复合材料学报. 2020, 37(10): 2512–2517 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200221.001>

[原位气相生长法制备碳纳米管/ \$\text{Al}_2\text{O}_3\$ 陶瓷复合材料](#)

Fabrication of carbon nanotubes/ Al_2O_3 ceramic composites by in-situ chemical vapor deposition growth method

复合材料学报. 2018, 35(1): 150–157 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170406.001>

[高温合金GH3039表面 \$\text{ZrO}_2\$ - \$\text{CeO}_2\$ / \$\text{Al}_2\text{O}_3\$ 复合陶瓷涂层抗热震性能](#)

Thermal shock resistance of ZrO_2 - CeO_2 / Al_2O_3 composite ceramic coating on superalloy GH3039 by sol-gel method

复合材料学报. 2018, 35(11): 3122–3129 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180308.002>

[用于梯度功能研磨抛光盘的SiC或 \$\text{Al}_2\text{O}_3\$ 颗粒/橡胶复合材料的制备及性能](#)

Preparation and properties of SiC or Al_2O_3 particles/rubber composites applied on functionally graded lapping and polishing plate

复合材料学报. 2020, 37(6): 1434–1441 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191030.003>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20201019.003

粉末烧结法和铸造法制备 ZrO_2 增韧 Al_2O_3 陶瓷颗粒增强高铬铸铁基复合材料及其耐磨性能



分享本文

高颖超^{1,2}, 孙书刚³, 钱兵², 汪兴兴¹, 吕帅帅¹, 朱昱^{*1}, 倪红军^{*1}

(1. 南通大学 机械工程学院, 南通 226019; 2. 南通高欣耐磨科技股份有限公司, 南通 226011;

3. 南通理工学院 机械工程学院, 南通 226002)

摘要: 将粒径为 1-2 mm 的 ZrO_2 增韧 Al_2O_3 陶瓷颗粒 (ZTA_p)、高铬合金粉末和黏结剂混合真空烧结制备蜂窝状预制体, 再浇注高铬铸铁液制备出 ZTA_p 增强高铬铸铁基复合材料。采用 SEM、EDS、XRD 分析复合材料的界面微观结构和物相组成, 通过三体磨损试验评价复合材料的耐磨性能。结果表明, 烧结高铬铸铁基体在铸造过程中发生重熔, 与铸造高铬铸铁基体呈冶金结合, ZTA_p 与金属基体界面结合致密, 无裂纹、气孔等缺陷。复合材料三体耐磨性能达到高铬铸铁的 3 倍以上。将该复合材料应用于制备磨辊件, 经过 5 000 h 服役, 柱状区和复合区在磨辊半径方向上的磨损量分别为 8.2 mm、5.9 mm, 预计寿命可达到高铬铸铁磨辊的 2 倍以上。

关键词: ZrO_2 增韧 Al_2O_3 ; 高铬铸铁; 复合材料; 粉末烧结; 铸造; 三体磨损

中图分类号: TB333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2021)08-2676-08

Preparation and wear resistance of ZrO_2 toughened Al_2O_3 ceramic particles reinforced high chromium cast iron matrix composites by powder sintering and casting

GAO Yingchao^{1,2}, SUN Shugang³, QIAN Bing², WANG Xingxing¹, LV Shuaishuai¹, ZHU Yu^{*1}, NI Hongjun^{*1}

(1. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China; 2. Nantong Gaoxin Antiwear

Technology CO. LTD., Nantong 226011, China; 3. School of Mechanical Engineering,

Nantong Institute of Technology, Nantong 226002, China)

Abstract: The honeycomb preforms were prepared by vacuum sintering the mixture of ZrO_2 toughened Al_2O_3 ceramic particles (ZTA_p) of 1-2 mm, high chromium alloy powder and binder. ZTA_p reinforced high chromium cast iron composites were then prepared by pouring high chromium cast iron. The interface microstructure and phase composition of the composites were analyzed by SEM, EDS and XRD. The wear resistance of the composite was evaluated by three-body abrasive wear test. The results show that the matrix of sintered high chromium cast iron is remelted in the process of casting and is metallurgical bonded with cast high chromium cast iron matrix. The interface between ZTA_p and metal matrix is compact, and there are no defects such as cracks and pores. The three-body abrasive wear resistance of the composites is more than 3 times of that of high chromium cast iron. The composites are applied to the preparation of grinding roller parts. After 5 000 h of service, the wear loss of the columnar zone and composite zone in the direction of grinding roller radius are 8.2 mm and 5.9 mm, respectively, and the expected

收稿日期: 2020-08-24; 录用日期: 2020-10-10; 网络首发时间: 2020-10-20 13:07:59

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201019.003>

基金项目: 江苏省重点研发计划项目 (BE2016107); 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD)

通信作者: 朱昱, 硕士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为新材料及成型工艺 E-mail: zhu.y@ntu.edu.cn;

倪红军, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为有色金属材料 E-mail: ni.hj@ntu.edu.cn

引用格式: 高颖超, 孙书刚, 钱兵, 等. 粉末烧结法和铸造法制备 ZrO_2 增韧 Al_2O_3 陶瓷颗粒增强高铬铸铁基复合材料及其耐磨性能 [J]. 复合材料学报, 2021, 38(8): 2676-2683.

GAO Yingchao, SUN Shugang, QIAN Bing, et al. Preparation and wear resistance of ZrO_2 toughened Al_2O_3 ceramic particles reinforced high chromium cast iron matrix composites by powder sintering and casting[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(8): 2676-2683(in Chinese).

service life can be more than twice that of the high chromium cast iron grinding roller.

Keywords: ZrO₂ toughened Al₂O₃; high chromium cast iron; composites; powder sintering; casting; three-body abrasive wear

火力发电、矿山、水泥等行业中使用的磨辊、磨盘、板锤等耐磨件，通常采用高铬白口铸铁或高锰钢为材料铸造而成。由于受到煤矿、砂石的磨损，工作环境恶劣，每年会造成大量的能源与材料的消耗^[1-2]。单一性能的材料已不能满足工况的需求，而陶瓷颗粒增强金属基复合材料兼具金属的韧性和陶瓷的高硬度和耐磨性，逐渐成为研究的热点^[3-8]。粉末冶金法早期被应用于制备陶瓷/金属基复合材料，范瑞瑞等^[9]采用粉末烧结法制备 Al₂O₃ 颗粒增强 Fe 基复合材料，研究表明添加 C 元素可以提升淬火后硬度，达到 HV 900，耐磨性能良好。目前铸渗法也被用于制备颗粒增强金属基复合材料，K. Konopka 等^[10]将 Al₂O₃ 陶瓷颗粒与一定比例陶瓷黏结剂混合制备多孔陶瓷预制体，然后浇注金属液制备出陶瓷增强 Fe 基复合材料。郑开宏等^[11]把 WC 颗粒制成蜂窝状芯板再铸渗高铬铸铁 (HCCI) 液制备出复合材料，WC 通过溶解扩散与 HCCI 基体冶金结合。

ZrO₂ 增韧 Al₂O₃ (ZTA) 陶瓷相较于 Al₂O₃，通过四方 ZrO₂ 应力诱导相变增韧和微裂纹增韧，可以作为金属材料的增强相^[12]。QIU 等^[13]通过快速流混合然后高压复合 (FM-PC) 技术制造 ZTA 颗粒 (ZTA_p) 增强 HCCI 基复合材料，当冲击能量在 1.5~4.5 J 之间变化时，其相对耐磨性为 HCCI 的 2.35~1.74 倍。在实际生产中，比利时 Magotteaux 公司^[14]已经开发出 Xwin 技术将 ZTA_p 网格体复合材料整体复合铸造在磨辊及衬板表面，磨损寿命较传统耐磨材料提升 1.5~2 倍。目前铸渗法难以解决金属与陶瓷润湿性的问题^[15-16]，用于制造大

型铸件风险性较大，而整体采用粉末烧结法会造成成本急剧增加。本文探索一种将粉末烧结法和铸造法结合制备 ZTA_p 增强 HCCI 基复合材料的制备工艺，并将该复合材料应用于制备磨辊、衬板等大型铸件。

本试验选择 HCCI 为基体，ZTA_p 为增强相。首先采用真空烧结法将陶瓷颗粒、高铬合金粉末和黏结剂混合烧结制备蜂窝状金属陶瓷预制体，再浇注高铬金属液，制备出 ZTA_p 增强 HCCI 复合材料，进而研究 ZTA 陶瓷与 HCCI 的界面微观组织，并通过三体磨料磨损试验评价金属陶瓷复合材料的耐磨性能。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

ZTA_p 中 ZrO₂ 的质量分数为 40wt%，粒径为 1~2 mm，部分物理/力学性能见表 1^[17]。高铬合金粉末的粒径为 50~100 μm，化学成分见表 2。

1.2 ZTA_p/HCCI 复合材料的制备

将 ZTA_p、高铬合金粉末和自制黏结剂按一定比例混合均匀，在网格模具中压制成型、干燥，将脱模后的陶瓷预制体在真空炉中 1 150℃ 下烧结 2 h，得到蜂窝状预制体。将预制体固定在铸造型腔内，浇注 HCCI 液，HCCI 化学成分见表 3，浇注温度为 1 450~1 465℃，冷却后得到 ZTA_p/HCCI 复合材料。

1.3 分析表征和性能测试

使用树脂砂轮切割复合材料，并用磨床预磨试样。使用 180#、400#、1 000#、2 000#四种规格的

表 1 ZrO₂ 增韧 Al₂O₃ 陶瓷颗粒 (ZTA_p) 物理/力学性能

Table 1 Physical and mechanical properties of ZrO ₂ toughened Al ₂ O ₃ ceramic particles (ZTA _p)					
Material	Density/ (g·cm ⁻³)	Vickers hardness	Coefficient of thermal expansion/10 ⁻⁶ ·°C ⁻¹	Fracture toughness/ (MPa·m ^{1/2})	Flexural strength/ MPa
ZTA _p	4.6	1 800-2 100	7.5-9.0	6.5-9.0	350-550

表 2 高铬合金粉末化学成分

Table 2 Chemical compositions of high chromium cast iron alloy powder

								wt%
Element	C	Cr	Si	Mn	Ni	V	Mo	Fe
Content	3.2-3.5	26-28	0.7-1.0	1.1-1.4	2.3-2.5	0.2-0.3	0.4-0.6	Bal.

表 3 铸造渗高铬铸铁 (HCCI) 化学成分
Table 3 Chemical compositions of cast high chromium cast iron (HCCI)

Element	C	Cr	Si	Mn	Ni	Mo	Cu	Fe
Content	3.0-3.3	24-26	0.5-0.8	0.6-1.0	0.3-0.5	0.4-0.6	0.2-0.3	Bal.

金相砂纸粗磨和细磨试样, 用抛光布抛光后使用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀 30 s。通过 4XC-PC 光学显微镜 (上海光学仪器一厂) 分析基体的金相组织, 使用 JSM-6510 扫描电镜 (日本电子株式会社) 和 Ultima IV 型 X 射线衍射仪 (日本理学株式会社) 分析金属和陶瓷结合区域的元素分布和物相组成。

耐磨性能使用济南翰森精密仪器有限公司制造的 MMH-5 三体磨料磨损试验机检测。设置主轴转速为 30 r/min, 载荷为 3 kg, 磨料采用石英砂, 硬度为 HV1 000~1 200, 粒径为 150~250 μm。磨损试样取样时垂直于蜂窝状结构, 使陶瓷颗粒占试样磨损表面的面积分数在三体磨损实验时保持不变, 三体磨料磨损试验原理及试样如图 1 所示。进行 15 min 预磨后称重得初始质量, 磨损试验共进行 8 个磨程, 每个磨程时间 60 min, 每个磨程结束均对试样进行清洗干燥并称重。

由于金属与陶瓷的密度不同, 复合材料的耐磨性能无法通过失重进行评价, 因此需要将失重转换为体积损失:

$$V_L = m_L / \rho \tag{1}$$

$$\rho = \varphi \cdot \rho_C + (1 - \varphi) \cdot \rho_M \tag{2}$$

式中: V_L 为复合材料体积损失; m_L 为复合材料磨损损失重; ρ 为复合材料密度; φ 为陶瓷的体积分数;

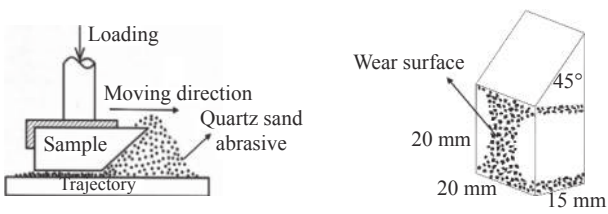


图 1 三体磨料磨损试验及试样示意图
Fig. 1 Diagram of three-body abrasive wear test and sample

ρ_C 为 ZTA 陶瓷密度; ρ_M 为 HCCI 密度。

2 结果与讨论

2.1 ZTA_p/HCCI 复合材料宏观形貌

预制体的宏观形貌如图 2(a) 所示。烧结后 ZTA_p 被 HCCI 充分包裹, 形成蜂窝状筋结构, 中间通孔直径为 20 mm, 可增加铸造过程中铁水与预制体的接触面积, 提升铸造后通孔内充型形成的金属基体与预制体的结合强度。

制备的 ZTA_p/HCCI 复合材料打磨后, 未发现裂纹、缩孔, 宏观形貌如图 2(b) 所示。复合材料表面可分为复合区和柱状区, 复合区中 ZTA_p 均匀分布在 HCCI 基体表面, 陶瓷颗粒间彼此孤立, 被 HCCI 基体隔开, 没有发生团聚现象, 如图 2(c) 所示。HCCI 铸造过程注入并填充蜂窝状预制体孔洞, 形成柱状区。柱状区内未出现冲散的陶瓷

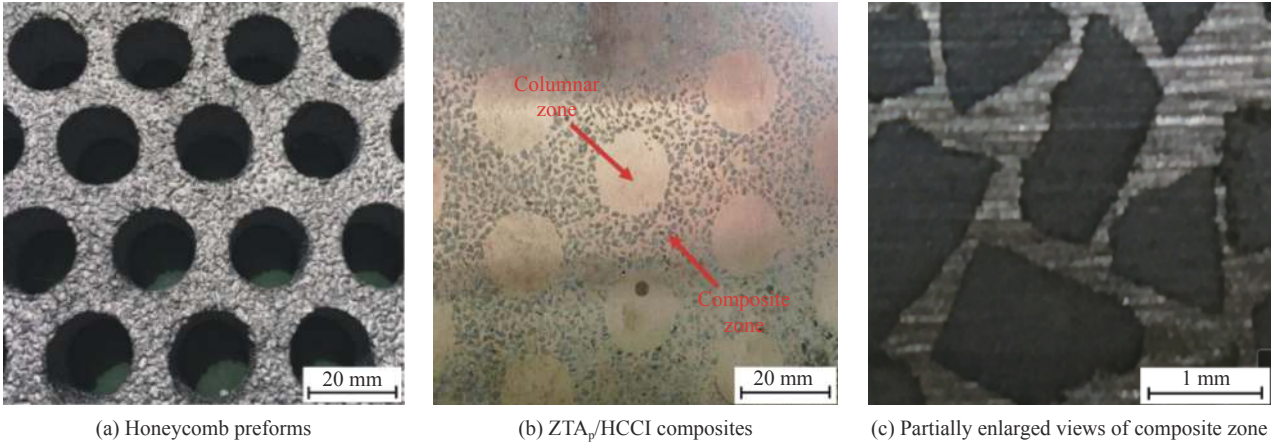


图 2 预制体和 ZTA_p/HCCI 复合材料宏观形貌

Fig. 2 Macroscopic morphologies of prefabrications and ZTA_p/HCCI composites

颗粒,说明烧结后的预制体可以有效抵挡铸造过程中铁水的高温冲刷。

2.2 ZTA_p/HCCI 复合材料的微观组织和形貌

图 3(a) 为 ZTA_p/HCCI 复合材料在光学显微镜下的整体金相组织 (热处理后), 复合材料组织可分为复合区中的烧结而成的 HCCI 基体和 ZTA_p 与柱状区中的铸造而成的 HCCI 基体。图中浅色区域为碳化物, 深色区域为 HCCI 基体, 右上角黑色大块区域为 ZTA 陶瓷。铸造 HCCI 中, 碳化物主要形式为细小的共晶碳化物分布在基体上, 形态为圆形或短杆形, 通过截线法测得碳化物的平均等效直径为 $3\sim5\text{ }\mu\text{m}$, 初晶碳化物数量较少且孤立分布, 对基体的割裂影响较小, 可以在提高耐磨性能的同时又保证了一定的韧性。图 3(b) 为图 3(a) 中铸造与烧结 HCCI 基体界面的局部放大图, 可

以看到基体彼此相连, 界面上的碳化物生长具有一定的方向性, 更接近垂直于界面方向, 并且界面两侧碳化物生长越过界面, 嵌入对方基体中, 表明了烧结 HCCI 在铸造过程中发生了重熔, 与铸造形成的 HCCI 基体形成冶金结合。烧结 HCCI 经历了“烧结-重熔-热处理”三个阶段, 基体上碳化物在多次析出的过程中不断长大并连接成块状, 碳化物的平均等效直径为 $20\text{ }\mu\text{m}$, 分布在晶界周围, 虽然会增加耐磨性, 但是会降低基体的韧性。图 3(c) 为图 3(a) 中 ZTA_p 与烧结 HCCI 基体界面的局部放大图, 金属基体与 ZTA_p 结合良好, 未观察到裂纹、气孔等缺陷, 烧结 HCCI 基体可以对 ZTA_p 提供良好的固定与支撑作用, 增强了 ZTA_p 的抗冲击性能。

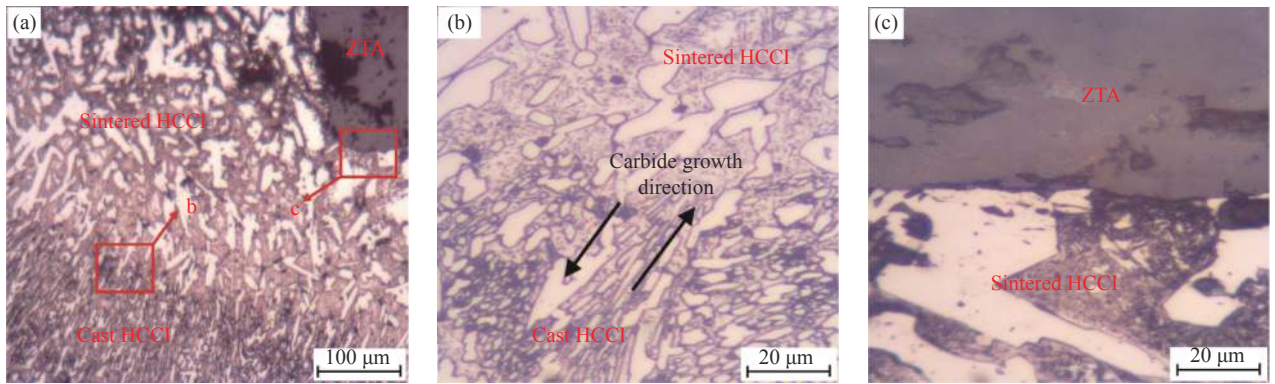


图 3 ZTA_p/HCCI 复合材料金相组织 (a)、铸造与烧结 HCCI 基体界面 (b) 和 ZTA_p 与烧结 HCCI 基体界面 (c)

Fig. 3 Metallographic structure of ZTA_p/HCCI composites (a), interface between cast and sintered HCCI matrix (b) and interface between ZTA_p and sintered HCCI matrix (c)

2.3 ZTA_p/HCCI 复合材料物相和元素分布

图 4 为 ZTA_p/HCCI 复合材料的 XRD 图谱。复合材料的物相主要包括陶瓷相中的 Al_2O_3 、单斜相的 $m\text{-ZrO}_2$ 和四方相的 $t\text{-ZrO}_2$ 。HCCI 基体物相主要为马氏体, 未检测到明显的奥氏体衍射峰, 推测可能是由于残余量过少。碳化物的物相为 $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$ 型碳化物, 其显微硬度高达 $\text{HV}1\ 200\sim1\ 800$, 是 HCCI 良好耐磨性的主要来源 [18]。

对 ZTA_p/HCCI 复合材料中 ZTA_p 与金属基体的界面进行 EDS 面扫描分析, 界面元素分布如图 5 所示。可以看出, 陶瓷相中 Al 元素几乎无扩散, Zr 元素有少量发生扩散。金属相中 Cr 元素的聚集区域与扫描电镜中碳化物的分布区域一致, Si 元素的聚集区域与 Fe 元素区域一致, 说明 Si 元素主要固溶于 Fe 基体中, 并降低了 Cr 元素的溶

解度 [19], 使 Cr 元素主要和 C 元素构成碳化物, 此

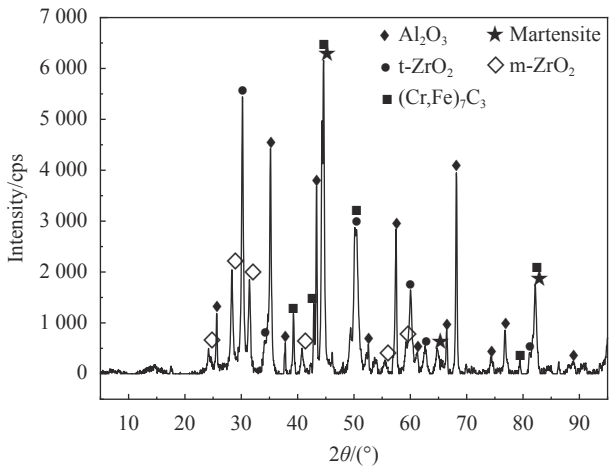


图 4 ZTA_p/HCCI 复合材料 XRD 图谱

Fig. 4 XRD pattern of ZTA_p/HCCI composites

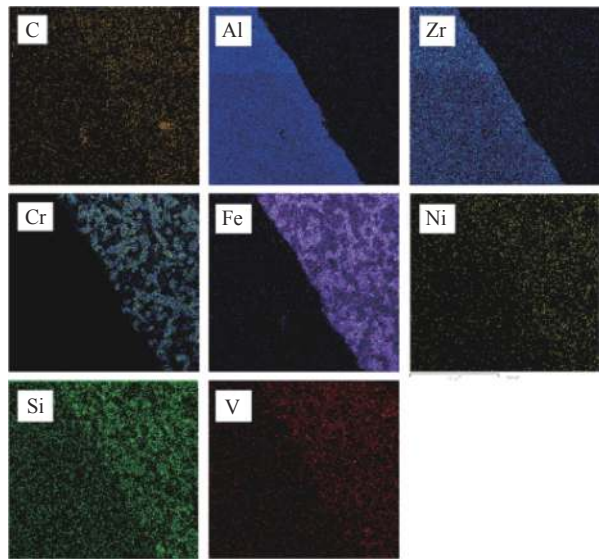
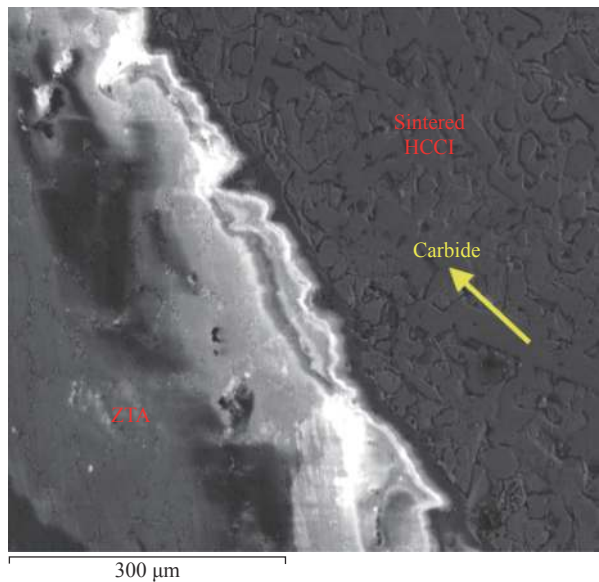


图5 ZTA_p/HCCI 复合材料界面元素分布

Fig. 5 Element distribution at the interface of ZTA_p/HCCI composites

外还有少量溶于 Fe 基体中。V、Ni 作为微量元素添加在金属基体中，V 元素作用是改善碳化物尺寸，促使碳化物球状化，消除粗大的柱状晶组织以细化晶粒，而 Ni 元素可以起到一定的改善 Fe 基体与 Al₂O₃ 润湿性的作用^[20]。

2.4 ZTA_p/HCCI 复合材料三体磨损性能

对磨损试样表面进行拍摄，将图片导入到 Image Pro Plus 软件中处理，通过对陶瓷颗粒色度阈值区域的设置，将陶瓷颗粒的区域识别并选中，如图 6 所示。再通过软件计算陶瓷颗粒所占百分比，从而确定陶瓷颗粒在磨损试样中的体积分数 φ 约为 32vol%。



图 6 ZTA_p/HCCI 复合材料磨损试样图像处理

Fig. 6 Image processing of wear ZTA_p/HCCI composite samples

图 7 为 ZTA_p/HCCI 复合材料与 HCCI 的三体磨损试验的体积损失量对比。其中图 7(a) 为单个磨程内的体积损失，可知在单个磨程内 ZTA_p/HCCI 复合材料的磨损体积损失远小于 HCCI，且复合材料和 HCCI 的单个磨程内体积损失随时间逐渐减少，并最终趋于稳定。在磨损的前后期复合材料的三体磨损性能均能达到 HCCI 的 3 倍以上。图 7(b) 为累计磨损体积损失，在 8 个磨程结束后，即磨损时间 480 min 后，ZTA_p/HCCI 复合材料和 HCCI 的累计磨损体积分别为 173.2 mm³ 和 757.6 mm³。

图 8(a) 为 ZTA_p/HCCI 复合材料柱状区的微观磨损形貌。对于柱状区的 HCCI 基体，由于表面没有 ZTA_p，抗磨相全部为 HCCI，因此磨损早期柱状区磨损量较复合区更大，是三体磨损试验中早期复合材料磨损量多于后期的原因。相对于 HCCI 基体，石英砂颗粒为硬质相。在磨损过程中，磨料的边角对 HCCI 基体产生切削，在表面产生犁沟，犁沟的方向与磨料切削方向基本一致。部分磨料在压力作用下，嵌入基体并使周围的金属基体软化发生塑性形变，产生挤出唇。磨损后期由于柱状区低于复合区，磨损量降低，主要对复合材料起到支撑作用。

图 8(b) 为 ZTA_p/HCCI 复合材料复合区的微观磨损形貌。在磨损前期，复合材料中的 ZTA_p 与 HCCI 基体共同承担磨损，由于陶瓷的硬度远大

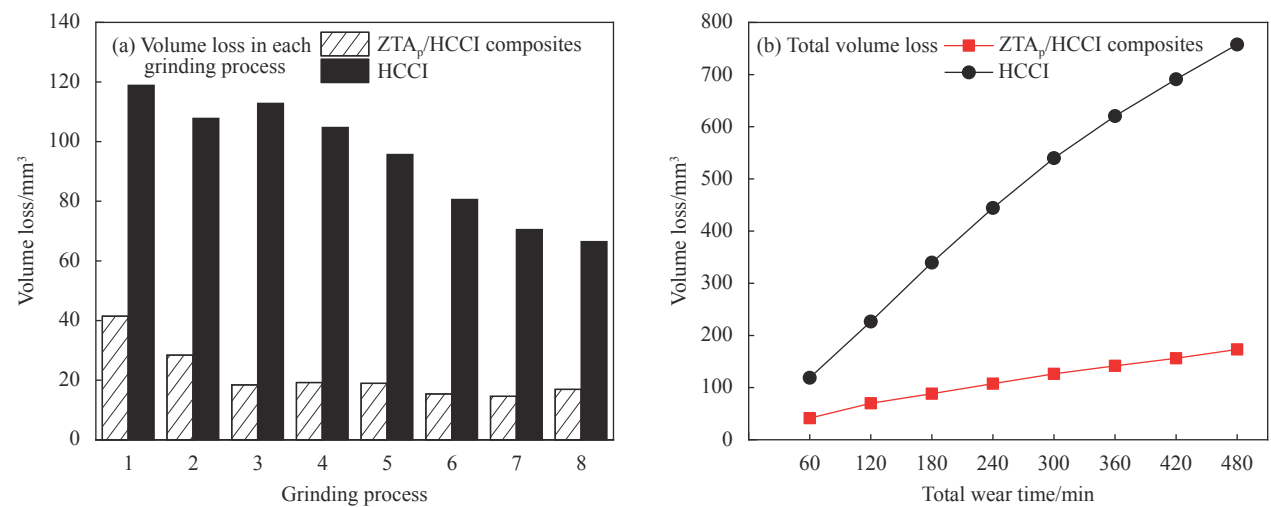


图 7 ZTA_p/HCCI 复合材料与 HCCI 磨损体积损失

Fig. 7 Volume loss of ZTA_p/HCCI composites and HCCI

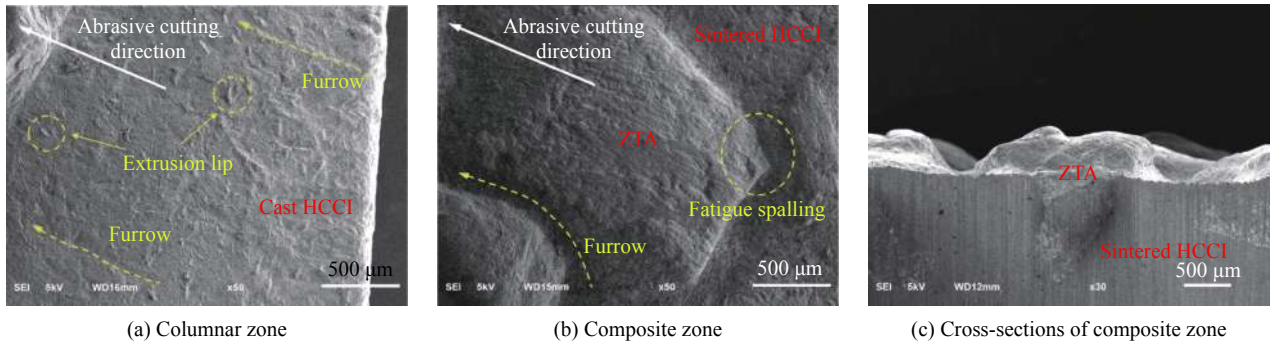


图 8 ZTA_p/HCCI 复合材料试样磨损微观形貌

Fig. 8 Micro morphologies of worn ZTA_p/HCCI composite samples

于基体，因此金属基体磨损量较大，使陶瓷颗粒逐渐突出于磨损表面。在磨损中期，陶瓷颗粒成为抗磨的主要承担相，陶瓷颗粒磨损方向前端的金属基体与磨料直接接触而磨损严重，陶瓷颗粒与前端金属基体存在明显的高度差，而后端的金属基体磨损量较小，与陶瓷颗粒形成斜坡状。一方面是由于陶瓷颗粒的凸出，形成了“阴影效应”，减少了磨料与金属基体的直接接触，如图 8(c) 所示。另一方面由于 ZTA 陶瓷的硬度大于石英砂磨料的硬度，磨料在与陶瓷颗粒发生接触磨损后破碎，后续对金属基体的磨削效果明显减弱，此时基体表面的犁沟主要出现在陶瓷颗粒的边缘。同时后端受磨损较弱的基体可以对陶瓷颗粒起到支撑作用，吸收部分磨料对陶瓷颗粒的切削应力，提升 ZTA_p 的韧性。磨损后期，陶瓷颗粒周围的金属基体磨损过于严重而下凹，失去对于陶瓷颗

粒的支撑，陶瓷颗粒受到应力增大产生接触疲劳，发生局部的疲劳剥落。在实际的磨损过程中，由于陶瓷颗粒在复合材料中三维分布的不均匀性，磨损的各个周期同时存在，因此在磨损一段时间后复合材料的耐磨性趋于稳定。

2.5 ZTA_p/HCCI 复合磨辊的实际使用情况

通过将多块制备的预制体拼接，并周向固定在磨辊铸造型腔内工作面的对应位置，再浇注 HCCI 液成功制备出 ZTA_p/HCCI 复合磨辊，并投入国内某电厂使用，安装服役 5 000 h 后，表面形貌如图 9 所示。磨辊表面未见裂纹和掉块现象，表明 ZTA_p/HCCI 复合磨辊可以承受运行过程中碾压煤矿石产生的振动，具有良好的韧性。复合区的金属陶瓷复合材料明显凸出于柱状区，成为主要的抗磨相，与三体磨损试验的结果一致。经过现场测量，柱状区和复合区在磨辊半径方向上的

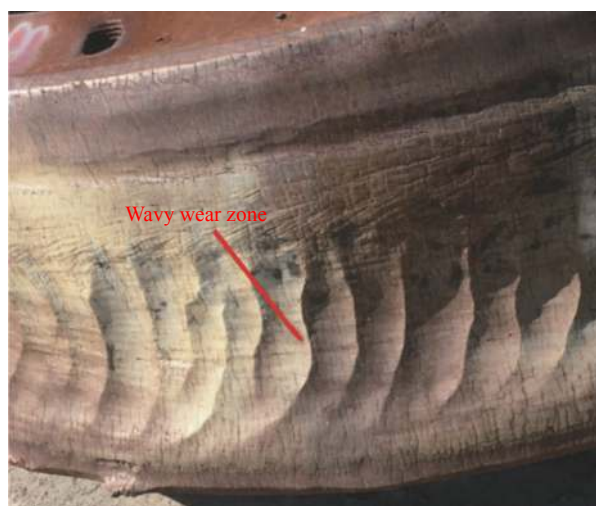
图9 ZTA_p/HCCI 复合磨辊表面磨损形貌Fig. 9 Wear morphology of ZTA_p/HCCI composite grinding roller

图10 HCCI 磨辊表面磨损形貌

Fig. 10 Wear morphology of HCCI grinding roller

磨损量分别为 8.2 mm、5.9 mm。图 10 为 HCCI 磨辊使用报废后的表面磨损形貌，实际工作时间约 10 000 h，磨辊半径方向的磨损量为 30~50 mm，工作面磨损严重且内凹，磨损区呈现波浪状，导致 HCCI 磨辊在使用后期对煤的碾压不充分，导致磨煤机出力降低^[21]。而 ZTA_p/HCCI 复合磨辊长期使用后依然能保持原始形貌，维持良好的研磨效率，保证磨煤机运行稳定，预计寿命可达到 HCCI 磨辊的 2 倍以上。

3 结论

(1) 预制体可以承受铸造过程中铁水的高温冲

刷，ZrO₂ 增韧 Al₂O₃ 陶瓷颗粒 (ZTA_p) 在高铬铸铁 (HCCI) 基体上均匀分布，未发生团聚和冲散现象。

(2) 烧结 HCCI 基体在铸造过程中发生重熔，并与铸造 HCCI 基体呈冶金结合。烧结 HCCI 基体与 ZTA_p 结合性能良好，界面无裂纹、气孔等缺陷。

(3) 三体磨损试验表明，ZTA_p 增强 HCCI 基复合材料体积损失随磨程增加逐渐减少并趋于稳定，三体耐磨性能达到 HCCI 的 3 倍以上。

(4) 成功制备出 ZTA_p/HCCI 复合磨辊，经过 5 000 h 服役，柱状区和复合区在磨辊半径方向上的磨损量分别为 8.2 mm、5.9 mm，预计寿命可达到 HCCI 磨辊的 2 倍以上。

参考文献:

- [1] 魏世忠, 徐流杰. 钢铁耐磨材料研究进展[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 523-538.
WEI S Z, XIU L J. Review on research progress of steel and iron wear-resistant materials[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(4): 523-538(in Chinese).
- [2] 钱兵, 孙书刚, 朱昱, 等. 中速磨煤机金属陶瓷复合磨辊及磨盘的研究[J]. 中国电力, 2014, 47(10): 122-125.
QIAN B, SUN S G, ZHU Y, et al. Development of ceramal compound grinding roller and refiner plate of medium speed mill[J]. Electric Power, 2014, 47(10): 122-125(in Chinese).
- [3] OJALA N, VALTONEN K, ANTIKAINEN A, et al. Wear performance of quenched wear resistant steels in abrasive slurry erosion[J]. Wear, 2016, 354-355: 21-31.
- [4] HU Y B, CONG W L. A review on laser deposition-additive manufacturing of ceramics and ceramic reinforced metal matrix composites[J]. Ceramics International, 2018, 44(17): 20599-20612.
- [5] SAHOO B P, DAS D. Tribological behaviour of ceramic and carbon nano-tube reinforced metal matrix composites-A review[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(9): 20549-20559.
- [6] MONILA J M, NARCISO J, WEBER L, et al. Thermal conductivity of Al-SiC composites with monomodal and bimodal particle size distribution[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 480(1-2): 483-488.
- [7] 周谟金, 蒋业华, 温放放. 热处理对高铬铸铁基蜂窝陶瓷复合材料耐磨性的影响[J]. 材料导报, 2017, 31(14): 117-121.
ZHOU M J, JIANG Y H, WEN F F. Effect of heat treatment on wear resistance of honeycomb ceramic preform reinforced chromium cast iron matrix composite[J]. Materials Reports, 2017, 31(14): 117-121(in Chinese).
- [8] 王文龙, 刘海云, 王晓杰, 等. 浸渗法制备ZTA陶瓷/铁基复合材

- 料研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(1): 37-41.
- WANG W L, LIU H Y, WANG X J, et al. Research progress in ZTA ceramic/iron matrix composites prepared by infiltration method[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2020, 40(1): 37-41(in Chinese).
- [9] 范瑞瑞, 张瑞, 李炎, 等. 粉末冶金法制备 Al_2O_3 颗粒增强 Fe 基复合材料[J]. 热加工工艺, 2011, 40(24): 120-123.
- FAN R R, ZHANG R, LI Y, et al. Fabrication of Fe matrix composite reinforced with Al_2O_3 particles by powder metallurgical method[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(24): 120-123(in Chinese).
- [10] KONOPKA K, OLSZÓWKA-MYALSKA A, SZAFRAN M. Ceramic-metal composites with an interpenetrating network[J]. Materials Chemistry & Physics, 2003, 81(2-3): 329-332.
- [11] 郑开宏, 高义民, 陈亮, 等. 颗粒增强铁基复合材料的三体磨料磨损性能[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(2): 176-182.
- ZHENG K H, GAO Y M, CHEN L, et al. Three-body abrasive wear behavior of iron matrix composites reinforced with tungsten carbide particles[J]. Tribology, 2012, 32(2): 176-182(in Chinese).
- [12] KIHARA M, OGATA T, NAKAMURA K, et al. Effect of Al_2O_3 additions on mechanical properties and microstructure of Y-TZP[J]. Journal of the Ceramic Society of Japan, 1988, 96: 635-642.
- [13] QIU B, XING S, DONG Q. Fabrication and wear behavior of ZTA particles reinforced iron matrix composite produced by flow mixing and pressure compositing[J]. Wear, 2019, 428-429: 167-177.
- [14] Magotteaux International SA (BE). Cast parts with enhanced wear resistance: US, 7513295[P]. 2006-01-20.
- [15] 陈建, 潘复生. 合金元素影响铝/陶瓷界面润湿性的研究现状[J]. 兵器材料科学与工程, 1999(4): 3-5.
- CHEN J, PAN F S. Research status of influence of alloying elements on wettability of Al/ceramic interface[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 1999(4): 3-5(in Chinese).
- [16] WITTIG D, GLAUCHE A, ANEZIRIS C G, et al. Activated pressureless melt infiltration of zirconia-based metal matrix composites[J]. Materials Science and Engineering, 2008, A488(1-2): 580-585.
- [17] 孙书刚, 钱兵, 李小武, 等. ZTA 颗粒增强高铬铸铁基复合材料制备及磨损性能研究[J]. 铸造技术, 2018, 39(8): 1663-1666.
- SUN S G, QIAN B, LI X W, et al. Preparation and wear properties of ZTA particle reinforced high chromium cast iron matrix composites[J]. Foundry Technology, 2018, 39(8): 1663-1666(in Chinese).
- [18] SOBOLEV A, MIRZOEVA A. Structure and stability of $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$ ternary carbides in solid and liquid state[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 804: 566-572.
- [19] 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 P A, XIAO L Q, GU J H, et al. Study on sintering preparation and properties of 15Cr hypoeutectic high-chromium cast iron[J]. Journal of Hu'nan University (Natural Sciences), 2019, 46(12): 58-64(in Chinese).
- [20] BAJWA R S, KHAN Z, BAKOLAS V, et al. Water-lubricated Ni-based composite($\text{Ni-Al}_2\text{O}_3$, Ni-SiC and Ni-ZrO_2) thin film coatings for industrial applications[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 29(1): 1-9.
- [21] 贾建民, 齐纪渝, 谢敬学. MPS 中速磨煤机磨辊磨损机理研究[J]. 华北电力大学学报, 1998, 25(4): 88-91.
- JIA J M, QI J Y, XIE J X. Research on wear mechanism of MPS type mill roll[J]. Journal of North China Electric Power University, 1998, 25(4): 88-91(in Chinese).