

Ni 对 ZTA 增强高锰钢基复合材料界面行为及耐磨性的影响

许国磊^{1, 2}, 李卫^{1, 2}, 易艳良^{1, 2}, 涂小慧^{1, 2}

(1. 暨南大学先进耐磨蚀及功能材料研究院, 广东广州510632;

2. 暨南大学高性能金属耐磨材料技术国家地方联合工程研究中心, 广东广州 510632)

摘要: 用硅溶胶粘结剂在ZTA (氧化锆增韧氧化铝) 陶瓷颗粒表面均匀附着Ni粉后与高锰钢粉混合压制成形, 通过烧结工艺制备实心预制体, 并浇注高锰钢液制备ZTA陶瓷颗粒增强高锰钢基复合材料。通过OM、SEM、XRD等分析手段分析预制体和复合材料的组织形貌及界面扩散行为。结果表明, 高锰钢添加15%Ni后金属与陶瓷之间的润湿角 θ 由104.7°降低至46.5°, 界面状态从不润湿变成润湿。Ni与Fe互溶形成FeNi固溶体, 降低了Fe的表面能, Fe、Mn、Ni向陶瓷中扩散。随着预制体中Ni含量的提高, 预制体基体组织和界面缺陷明显减少, 硬度显著提高, 15%Ni预制体基体硬度较无Ni预制体提高了30.3%。Ni改性ZTA增强高锰钢基复合材料的三体耐磨性远优于普通高锰钢, 提高幅度为170%。

关键词: ZTA; 润湿性; 元素扩散; 高锰钢; 金属/陶瓷界面

作者简介:

许国磊(1998-), 男, 硕士生, 主要从事金属耐磨材料研究。E-mail: 956432421@qq.com

通讯作者:

涂小慧, 男, 教授。电话: 020-85223562, E-mail: 3162510484@qq.com

易艳良, 男, 副教授。电话: 15091339192, E-mail: yiyianliang@stu.jnu.edu.cn

中图分类号: TG142.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

04-0394-07

基金项目:

国家自然科学基金(52005217); 广东省教育厅大学研究平台和研究项目(2022ZDZX3003); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2022A1515010091、2021A1515010523、2020A1515110020); 中央高校基础科学研究项目(No.21620334)。

收稿日期:

2022-11-09 收到初稿,

2023-01-08 收到修订稿。

磨损不仅是摩擦学的重要研究内容, 也是导致零件失效的主要原因之一。据不完全统计, 由磨损导致约占失效零部件总数的80%, 而磨损中磨料磨损约占50%^[1]。耐磨件通常应具有高强高硬、耐磨、抗变形、抗疲劳、抗冲击等性能^[2], 以高锰钢、高铬铸铁、合金钢为原料制备的传统耐磨材料性能和使用寿命无法完全满足日益严峻工况的要求, 而现阶段学者们研究的陶瓷颗粒增强金属基复合材料能够满足特殊耐磨件的性能需求。然而, 由于金属与陶瓷之间热膨胀系数、键合方式、键能及表面能等差异较大, 导致金属与陶瓷的润湿性和结合强度较差。例如, 耐热钢与氧化铝陶瓷的接触角是92°, 属于不润湿^[3]。所以改善金属/陶瓷界面润湿性是制备高性能陶瓷颗粒增强金属基复合材料的关键, 也是我们目前需要解决的难题^[4]。

改善金属/陶瓷润湿性的方法通常有: ①使用涂层技术, 在陶瓷表面涂覆一层与金属润湿性好的过渡性涂层, 从而提高陶瓷颗粒与金属基体的结合强度。王恩泽等^[5]通过化学气相沉积技术分别在Al₂O₃表面均匀附着Ni、TiN涂层, 使Al₂O₃陶瓷和钢液的润湿性得到很大提高, 复合材料的耐磨性也得到了改善; Lemster^[6]等将Ti粉和Al₂O₃颗粒均匀混合制得预制件, 并使用钢液在1 600 °C下对其进行浸渗, 渗透深度随Ti含量的增加而增大, 最终渗透深度可达约3 mm; ②在液体金属基体中添加合金元素, 通过添加合金元素降低金属液的表面张力和液/固界面能及促进界面反应来改善金属/陶瓷润湿性。刘耀辉等^[7]研究了Nb、Ce对Al₂O₃与中锰钢界面润湿、界面反应、界面结构以及界面结合强度的影响。试验表明, 中锰钢中加入Nb、Ce可以使润湿角明显下降, 界面状态由不润湿转化为润湿; ③其他手段: 潘蕾等^[8]用高能超声处理熔体制备了SiC/ZA27复合材料; 李英民等^[9]采用电磁搅拌法制备了外表面富集Mg₂Si的梯度复合材料; 利用金属流体搅拌后的流体动力学效应使与金属润湿性不强的陶瓷颗粒均匀分布在基体中^[10]; 提高润湿过程中的温度^[11]。

目前常用的手段是对陶瓷颗粒进行改性处理, 主要是通过高活性合金元素来改善金属/陶瓷润湿性^[12]。活性合金元素改善润湿性主要通过两方面作用: 一是破坏金

属表面分子间化学键，与金属中的元素形成金属间化合物和固溶体，进而可以降低熔融金属液的表面能，使其向陶瓷颗粒中扩散^[13]；二是通过降低液/固界面的界面能，在界面处形成过渡层，使金属与陶瓷的结合方式由机械结合变为冶金结合^[14]。目前对陶瓷颗粒改性的工艺主要有：①陶瓷颗粒与活性金属通过无机或有机粘结剂再固化成形，此类方法得到的预制体抗冲击强度较弱，粘结剂在钢液浇注后失效的残留物可能会在界面处降低界面结合强度；②通过化学镀、电镀等工艺对陶瓷颗粒进行表面合金化处理，可以改善陶瓷与金属基体之间的润湿性，但是因为结合强度低，金属层容易被破坏而导致剥落，并且在高温钢液的热冲击过程中，金属层容易被破坏或者冲走，最后导致活性金属不能有效地作用在界面处；③通过磁控溅射来改性陶瓷制备复合材料，但因为工艺复杂，成本较高，不适合大规模生产^[15-17]。

本试验采用硅溶胶粘结剂在ZTA陶瓷颗粒上均匀附着Ni粉，与高锰钢粉压制成形烧结得到实心预制体，再通过砂型铸造工艺浇注高锰钢液制备复合材料。对预制体和复合材料进行组织形貌、元素分布及物相分析，对金属/陶瓷界面的结合情况进行分析讨论，并研究Ni对润湿性和界面结合性的作用机理。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

选用的陶瓷颗粒是ZA40，由40%ZrO₂和60%Al₂O₃组成，目数为8~10目，表1和表2分别是ZTA陶瓷颗粒的性能参数和高锰钢的主要化学成分。

表1 ZTA陶瓷颗粒的性能参数
Table 1 Performance Parameters of ZTA Ceramic Particles

材料	密度 /(g·cm ⁻³)	硬度 HV	堆积密度 /(g·cm ⁻³)	熔点 /°C	热膨胀系数 ×10 ⁻⁶ /°C
ZTA	4.60	1 600~1 700	5.50~6.50	1 890	7.50~8.50

表2 高锰钢的主要化学成分
Table 2 Main composition of high manganese steel w_B/%

C	Mn	Si	P	S	Fe
1.05~1.35	11~14	0.30~0.90	≤0.06	≤0.04	余量

1.2 预制体及复合材料制备

(1) 确定Ni含量及烧结工艺。①将高锰钢粉与Ni粉按不同比例混合制备金属粉体；②金属粉体与陶瓷颗粒压制成形得到预制体；③将不同Ni含量的预制体按不同的烧结条件进行烧结；④预制体磨抛处理，根

据组织形貌、界面结合情况和能谱分析确定Ni含量及烧结过程。

(2) 预制体准备。①用硅溶胶粘结剂在陶瓷颗粒表面均匀附着Ni粉后，与高锰钢粉混合压制成形后，置于80℃干燥箱保温8h；②将干燥的样块放入管式炉中，在氢氩混合气氛保护下烧结成具有一定强度的预制体；③在预制体中心加工出Φ8mm通孔，准备浇注。

(3) 复合材料制备。①设计模具、冒口和浇道，将预制体固定在砂型型腔内，控制钢液成分达到要求；④浇注高锰钢液，浇注温度1 540~1 580℃，冷却后得到ZTA陶瓷颗粒增强高锰钢基复合材料。

1.3 分析与表征

利用JY-JC2000C接触角检测仪测量金属与陶瓷片之间的接触角，具体过程如下：①把高锰钢粉末与Ni粉混合均匀后压制成形；②把样块放入电弧熔炼炉熔炼，熔炼后的合金加工成柱状试样；③将柱状合金水平放置在ZTA陶瓷片上，然后水平放入管式炉烧结，使合金在陶瓷表面充分熔融铺展；④测量合金与ZTA陶瓷之间的接触角。

使用金相试样切割机对预制体和复合材料切割取样，借助DM3000莱卡金相显微镜和PhenomXL台式扫描电子显微镜对试样组织形貌和界面结合情况进行分析，并利用电镜搭载的EDS对金属/陶瓷界面元素进行线扫描分析，使用Ultima IV X射线仪对试样（元素扩散）进行物相分析（20°~100°，3°/min），最后使用HXD-1000TMS/LCD数字式显微硬度计测量试样（元素扩散）界面硬度分布。

1.4 三体磨料磨损

三体磨料磨损试验在MMH-5A型环块磨损试验机上进行，图1为三体磨料磨损试验原理和磨损试样尺寸。磨损试验机主转速30 r/min，单次磨损时间为30 min，载荷50 N，轨道半径180 mm。每个试样进行五次磨损试验，共计150 min，每次磨损试验均采用新石英砂，每次磨损试验结束后放入无水乙醇中超声波清洗10 min，在80℃干燥箱中干燥30 min后用电子天平

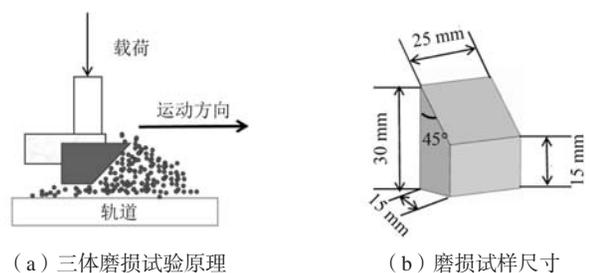


图1 三体磨损试验原理和磨损试样尺寸

Fig. 1 Three body wear test principle and wear specimen size

(1 mg) 称重, 5次磨损试验结束后借助RTEC多功能摩擦磨损试验机搭载的光学形貌仪对磨损试样磨损面进行3D形貌分析。

2 试验结果与讨论

2.1 润湿性检测

金属与陶瓷之间的接触角采用滴座法测量, 将金属样块水平放置于陶瓷片上, 然后整体放入管式炉中烧结, 使金属在陶瓷表面充分熔融铺展, 待冷却后测量接触角^[18]。图2是高锰钢添加15%Ni前后与ZTA陶瓷颗粒之间的接触角。由图2可知, 添加Ni前高锰钢与ZTA陶瓷颗粒表面之间的润湿角是104.7°, 高锰钢添加15%Ni后, 与陶瓷颗粒表面之间的润湿角减小至46.5°, 界面状态从不润湿变成润湿。这说明Ni加入能够显著降低高锰钢与ZTA陶瓷之间的接触角, 改善界面润湿性。

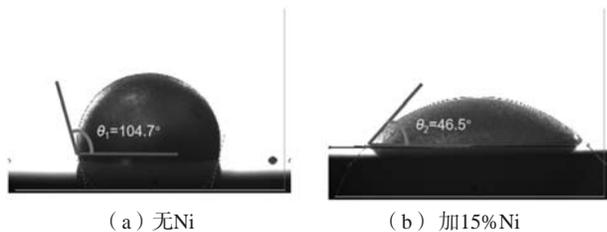


图2 添加Ni对高锰钢与ZTA陶瓷之间的接触角

Fig. 2 Effect of Ni addition on contact angle between high manganese steel and ZTA ceramics

2.2 界面组织形貌分析

预制体的宏观形貌如图3a所示, 预制体成形较好, 圆柱状预制体直径23 mm、高10~15 mm。烧结好的预制体在中心位置加工出直径8 mm通孔, 可以改善铸渗效果并且在浇注过程中稳定预制体的位置。图3b、c是15%Ni预制体浇注后复合材料的组织形貌, 白色部分是高锰钢基体, 深色部分是ZTA陶瓷, 陶瓷和金属基体结合紧密, 基体组织无明显疏松缩孔等缺陷, 铸渗效果较理想, 基体金属将陶瓷颗粒紧密包覆, 材料界面未见明显裂纹和孔洞存在。

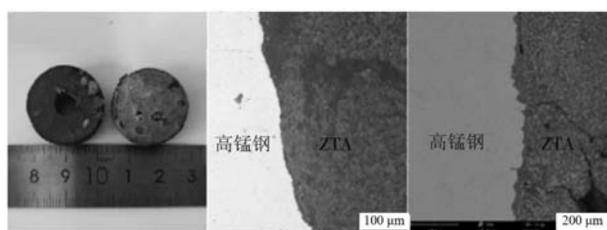


图3 材料组织形貌

Fig. 3 Microstructure and morphology of materials

图4是15%Ni预制体和复合材料的XRD衍射图谱。从图中可知, 预制体和复合材料的相组成一致, 主要由 ZrO_2 、 Al_2O_3 、 $(Fe, Mn)C$ 、FeNi及硅酸盐(Si_xO_y)组成, ZrO_2 和 Al_2O_3 来源于ZTA陶瓷, $(Fe, Mn)C$ 是高锰钢中的碳化物, FeNi是Ni加入后与Fe形成的连续固溶体, Si_xO_y 来源于硅溶胶粘结剂。由衍射图谱可知, 预制体和复合材料中均未生成金属与陶瓷元素的反应产物, 说明Ni加入并没有促进金属与陶瓷元素发生冶金反应。而Ni与Fe在液态和固态时可以任意比例互溶, 从图谱中也可以发现有FeNi峰存在, 因为Fe和Ni的粒子半径相差较小, 所以互溶后会形成FeNi固溶体^[19]。

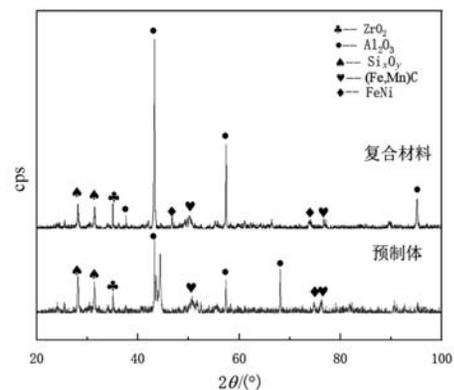


图4 15%Ni预制体和复合材料衍射图谱

Fig. 4 Diffraction patterns of 15% Ni preforms and composite material

图5是不同Ni含量预制体在不同烧结条件下的组织形貌。从图中可以看出, 随着Ni含量和烧结温度的提高, 基体组织和界面的缺陷显著减少, 这些缺陷主要是碳从奥氏体中脱溶后形成的碳化物, 再经过磨抛处理后脱落残留下来的, 而Ni的加入可以抑制基体中碳的脱溶, 增加奥氏体钢固溶的碳含量, 同时也使晶界处析出的碳化物趋于弥散分布并粒化, 从而抑制因碳含量提高导致碳化物析出而使材料韧性急剧下降的趋势, 材料的硬度和耐磨性能也得到提高^[20-21]。因此Ni加入有利于减少缺陷, 可以改善基体组织形貌和界面结合性。

2.3 高锰钢基体与ZTA陶瓷之间的界面分析

如表3所示^[24], 在最稳定界面(能量最低)下, Fe晶体的表面能为 $2.16 J/m^2$, Ni晶体的表面能为 $1.80 J/m^2$, 而Fe-Ni晶体的表面能为 $1.69 J/m^2$ 。金属的键合方式以金属键为主, 稳定性较低, 表面能高, 陶瓷颗粒键合方式以离子键和共价键为主, 稳定性较高, 表面能低^[22]。FeNi晶体的表面能比Fe晶体的表面能低, Ni融入基体后形成的FeNi固溶体降低了金属基体的表面能, 有利于金属基体元素向陶瓷扩散, 改善金属/陶瓷

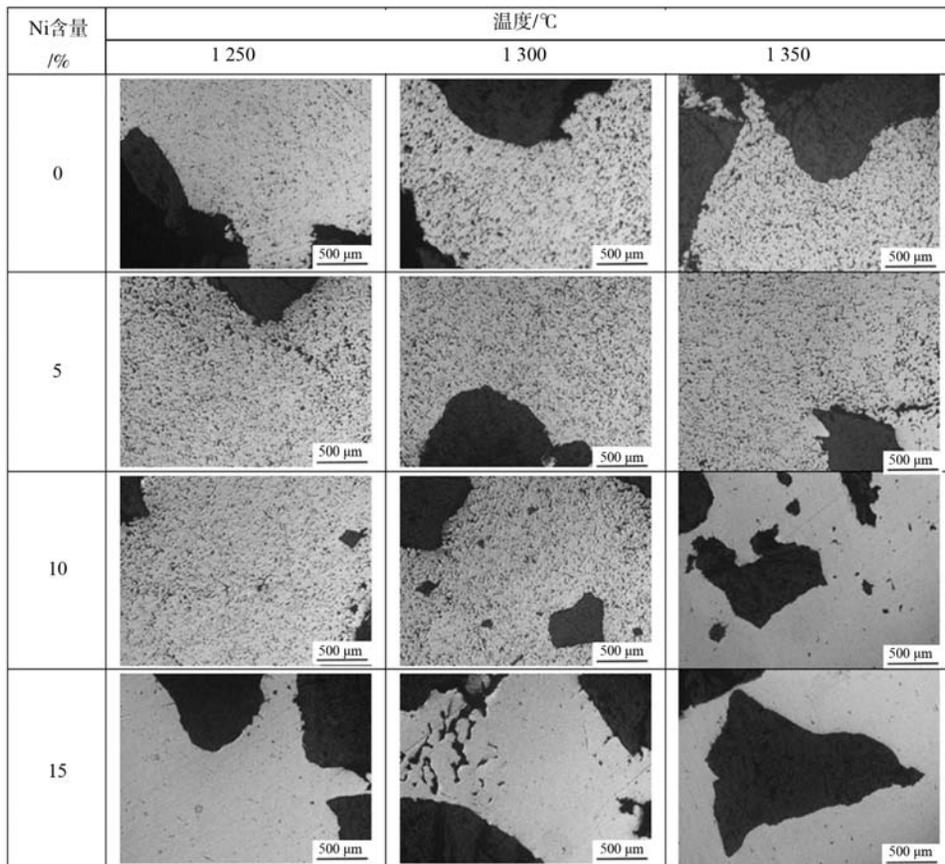


图5 不同Ni含量预制体的组织形貌

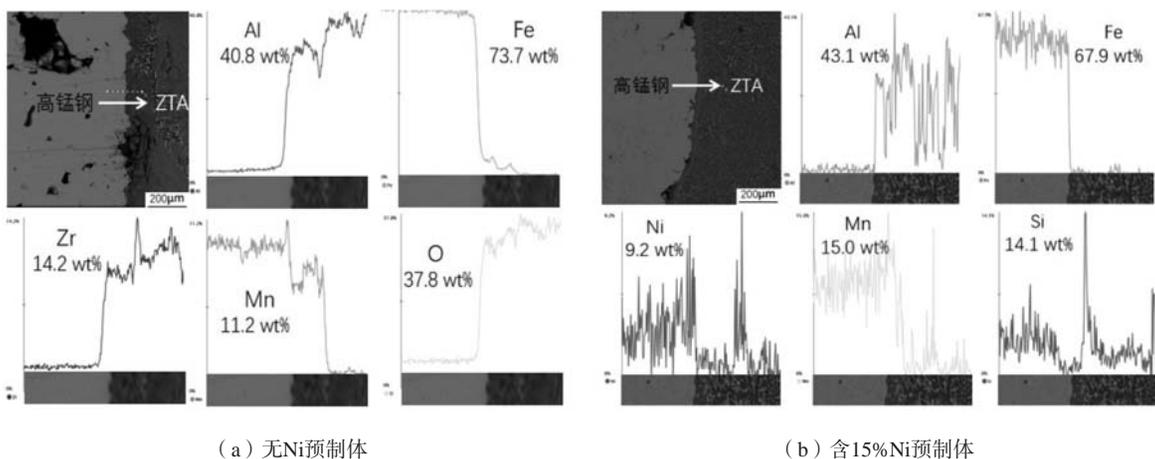
Fig. 5 Microstructure of preforms with different Ni content

表3 不同晶体的表面能
Table 3 Surface energy of different crystals

编号	晶体	最稳定晶面	表面能/(J·m ⁻²)
1	Fe	(110)	2.16
2	Ni	(111)	1.80
3	Fe-Ni	(100)	1.69

润湿性和界面结合性^[23]。

图6是Ni改性前后复合材料界面形貌及元素分布。从界面形貌对比分析可以看出，未处理过的陶瓷增强复合材料组织缺陷较多，界面处有明显的孔洞和裂缝存在；而经过Ni改性处理后的复合材料表面基体组织和界面处的缺陷较少。由EDS检测结果分析，灰色区



(a) 无Ni预制体

(b) 含15%Ni预制体

图6 复合材料界面形貌及元素分布

Fig. 6 Interface morphology and element distribution of composite

域是ZTA陶瓷，白色区域是高锰钢基体。从界面两侧的元素分布可以看出，基体中的Mn、Ni有部分向陶瓷扩散，陶瓷元素基本不发生扩散。根据形貌和成分线扫描分析可以判断，Mn、Fe、Ni元素分布曲线在界面两侧变化梯度较大，含量在界面处发生骤降，界面处没有过渡层的形成，基体与陶瓷元素没有在界面处形成冶金产物。从上文物相分析中可以发现FeNi固溶体的存在，固溶体的形成降低了Fe的表面能，基体元素向陶瓷颗粒中扩散，改善了金属/陶瓷界面润湿性，也提高了界面的结合性能^[25]。

2.4 硬度及耐磨性分析

从上文组织形貌可知（图5），金属基体表面经过磨盘和砂纸磨抛处理后，表面的碳化物及杂质会剥落，同时在基体表面会留下孔隙缺陷，这些缺陷会严重影响基体的硬度及界面的结合情况。图7是不同Ni含量的预制体维氏硬度值。对比分析不同Ni含量预制体形貌图和硬度值可知：无Ni预制体基体组织中缺陷较

多，导致硬度值较低为HV 267.9；当Ni含量达到10%后，基体组织缺陷明显减少，硬度明显提高，其值为HV 342；15%Ni预制体基体组织无明显缺陷，硬度值最高达到HV349。图8是15%Ni预制体制备的复合材料

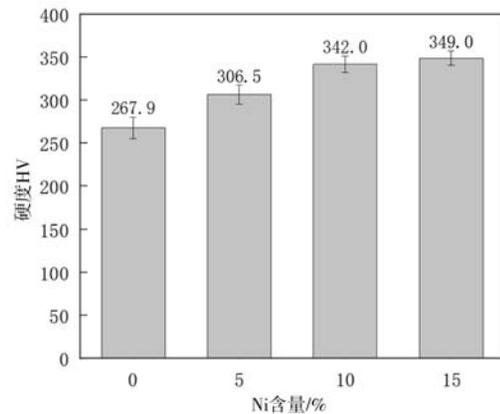
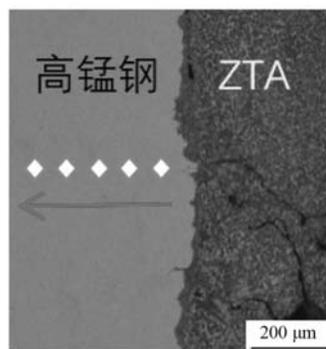
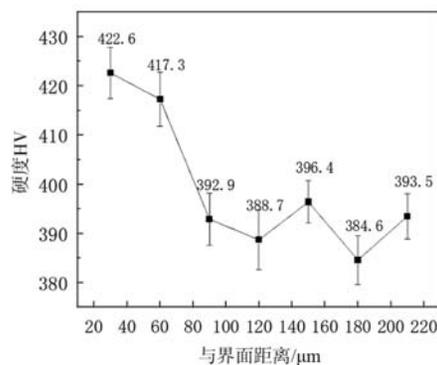


图7 不同Ni含量预制体的硬度值

Fig. 7 Hardness of preforms with different Ni content



(a)



(b)

图8 复合材料（15%Ni预制体）界面硬度变化

Fig. 8 Interface hardness change of composite (15% Ni preform)

界面处硬度值随距界面距离的变化曲线图。从界面处开始每间隔30 μm依次测量硬度，从硬度值变化曲线可知，硬度轻微降低后趋于平滑，这进一步说明界面处并没有过渡层的形成，且界面处并没有形成冶金产物，意味着添加Ni的作用主要是改善高锰钢/ZTA陶瓷界面润湿性。

图9为普通高锰钢与复合材料三体磨损质量损失量对比图。根据磨损量对比可以看出，高锰钢和15%Ni复合材料质量损失量变化较规律，而无Ni复合材料从90 min后质量骤降，这是因为陶瓷与金属结合较差导致在磨损过程中陶瓷剥落。对比高锰钢和15%Ni复合材料质量损失，15%Ni复合材料的三体耐磨性远优于普通高锰钢，且这种优化效果随着磨损时间的延长而增大。经过5次磨损试验后，普通高锰钢的质量损失量为2.78 g，复合材料的质量损失量为1.02 g，复合材料三体耐磨性

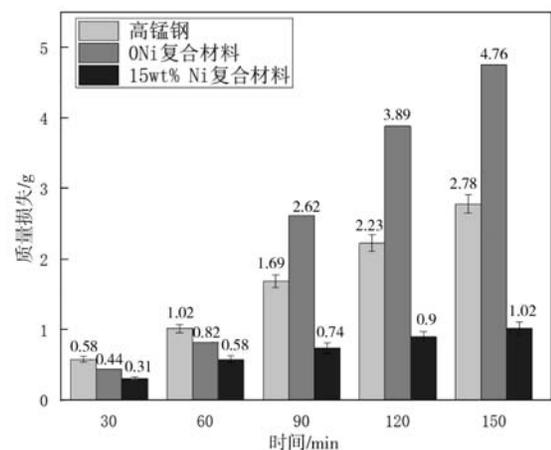


图9 普通高锰钢与复合材料的三体磨损质量损失量对比

Fig. 9 Comparison of three-body wear mass loss between ordinary high manganese steel and composite

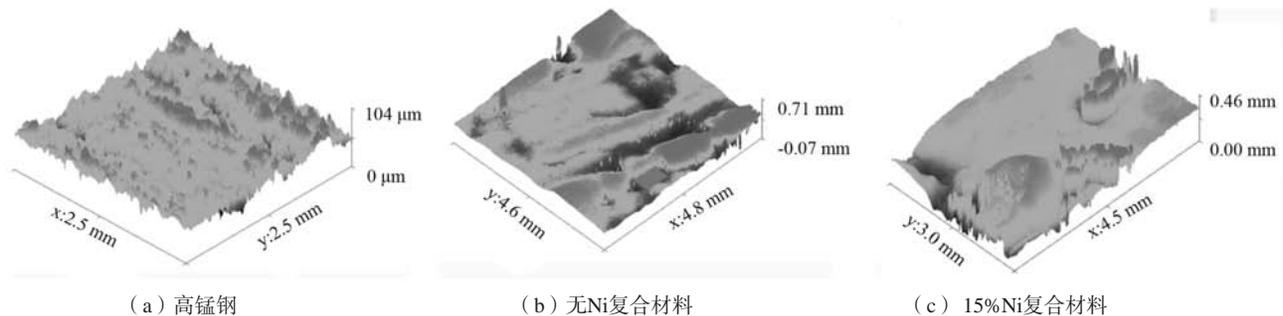


图10 三体磨损形貌

Fig. 10 Three body wear morphology

是普通高锰钢的2.7倍。这说明Ni改性陶瓷增强复合材料可有效抵抗三体磨料磨损，即能够提高高锰钢的耐磨性。

为进一步分析Ni改性ZTA颗粒对高锰钢三体磨损的影响机制，试验对普通高锰钢和复合材料磨损面进行3D形貌对比分析，如图10所示。从磨损深度可以看出，普通高锰钢为104 mm，无Ni复合材料为78 mm，而15%Ni复合材料只有46 mm。由图10a可知，普通高锰钢磨损面呈现出长且深的平行犁沟形貌。多尖锐突角的石英砂颗粒在高应力作用下被挤压和镶嵌于磨损面，呈现出细长深的平行犁沟形貌。无Ni复合材料磨损表面残留着深坑，这是因为金属和陶瓷结合较差，随着磨损时间的增加陶瓷开始出现剥落的现象。而15%Ni复合材料的磨损面形貌与普通高锰钢和无Ni复合材料相异甚大，磨损面中金属基体向下凹陷而陶瓷颗粒凸于表面，如图10c所示，这主要是由于Ni改性陶瓷增强复合材料中金属元素向陶瓷中扩散，改善金属/陶瓷界面润湿性，并且Ni加入降低了基体组织缺陷和界面孔洞，改善界面结合性。在复合材料磨损试验时，金属基体将率先遭磨料犁削剥落，随后磨损陶瓷，而

因为陶瓷与金属结合紧密，陶瓷磨损不易剥落能更好地阻止基体被进一步磨损。

3 结论

(1) Ni加入使高锰钢与ZTA陶瓷颗粒的润湿角由 104.7° 降低至 46.5° ，界面状态从不润湿变成润湿，同时也减少预制体基体组织和界面处的缺陷和孔洞数量，有利于改善界面结合性。

(2) 预制体和复合材料中均没有金属和陶瓷元素的反应产物，Ni与Fe互溶形成FeNi固溶体，降低金属基体表面能，使基体元素向陶瓷颗粒扩散。

(3) 随着预制体中Ni含量的提高，硬度显著提高，15%Ni预制体高锰钢基体硬度较无Ni预制体提高了30.3%。

(4) Ni改性ZTA增强高锰钢基复合材料的三体耐磨性远优于普通高锰钢，提高幅度为170%，ZTA与高锰钢基体界面结合良好。

参考文献:

- [1] 蒋业华, 李祖来, 卢德宏, 等. 陶瓷颗粒增强钢铁基空间构型耐磨复合材料 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [2] 李卫, 邓世萍, 宋量, 等. 铸造耐磨材料 [J]. 铸造设备与工艺, 2019 (1): 61-68.
- [3] 王恩泽, 王恩万, 邢建东, 等. 涂层对氧化铝/耐热钢液间湿润角的影响及其应用 [J]. 西安交通大学学报, 2000, 34 (11): 78-81.
- [4] 国运之. 陶瓷相增强金属基复合材料的研究进展 [J]. 中国粉体工业, 2021 (3): 4-7.
- [5] 王恩泽, 鲍崇高, 邢建东. 涂层对氧化铝/耐热钢基复合材料磨料磨损性能的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2003, 37 (9): 945-948.
- [6] LEMSTER K, GRAULE T, KUEBLER J. Processing and microstructure of metal matrix composites prepared by pressureless Ti-activated infiltration using Fe-base and Ni-base alloys [J]. Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2005, 393 (1-2): 229-238.
- [7] 刘耀辉, 何镇明, 于思荣, 等. Nb, Ce对 Al_2O_3 -中锰钢界面的影响 [J]. 材料研究学报, 1989, 3 (5): 409-413.
- [8] 潘蕾, 陈锋, 吴申庆, 等. 高能超声作用下 $SiC_p/ZA27$ 复合材料的制备及性能 [J]. 铸造, 2003, 52 (4): 235-238.
- [9] 李英民, 艾秀兰. 电磁搅拌对 Al/Mg_2Si 复合材料宏观偏析的影响 [J]. 铸造, 2002, 51 (12): 756-758.
- [10] ROHATGI P K, ASTHANA R, KHAN M A. Mixing quality modeling in the manufacture of cast metal matrix particulate composites[C]// Cast Reinforced Metal Composites. Phoenix: ASM, 1988: 85.
- [11] YUN Joon Chul, LEE Geon Yong, LEE Jai-Sung. Effect of process temperature on the Sm_2Fe_{17} alloying process during a reduction-diffusion process using Fe nanopowder [J]. Korean Journal of Metals and Materials, 2010, 48 (11): 995-1002.
- [12] 刘娟娟, 苟小斌. 金属与陶瓷的润湿性概述 [J]. 城市建设理论研究, 2013 (24): 1-3.

- [13] 王晓杰, 刘海云, 贾登云, 等. ZTA陶瓷颗粒增强高铬铸铁基复合材料界面组织及元素分布特征 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41 (9): 1157-1162.
- [14] 屈伟, 范同祥. 金属/陶瓷润湿性的实验表征和理论预测研究进展 [J]. 材料导报, 2019, 33 (21): 3606-3612.
- [15] 莫炯良, 涂小慧, 郑宝超, 等. ZTA颗粒增强高铬铸铁基复合材料的制备及其耐磨性能研究 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (10): 57-61.
- [16] 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.
- [17] FAHRENHOLTZ W G, ELLERBY D T, LOEHMAN R E. Al₂O₃-Ni composites with high strength and fracture toughness [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2000, 83 (5): 1279-1280.
- [18] 袁海森, 李宏, 王钰洋. 陶瓷与金属冶金连接技术研究进展 [J]. 装备环境工程, 2020, 12 (6): 84-92.
- [19] KHAYAT Z R, PALMER T A. Impact of iron composition on the properties of an additively manufactured solid solution strengthened nickel base alloy [J]. Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2018, 718: 123-134.
- [20] 何力, 金志浩, 卢锦德. 合金化奥氏体锰钢的研究 [J]. 机械工程材料, 2000, 24 (2): 22-24, 27.
- [21] 黄芬芬, 朱定一, 王明杰, 等. Ni对高锰奥氏体球墨铸铁组织和性能的影响 [J]. 铸造技术, 2011, 32 (12): 1669-1672.
- [22] 许育东, 刘宁, 陈名海, 等. 金属陶瓷中陶瓷相的润湿性与其价电子结构的关系 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2004, 27 (2): 123-126.
- [23] 赵帅, 孙建春, 周文, 等. 基于电沉积镍的低碳钢表面合金化扩散研究 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (10): 137-139, 143.
- [24] LU W K. Reply to: "comments on 'temperature dependence of surface energy of liquid iron and nickel'" [J]. Scripta Materialia, 1974, 8 (6): 635-635.
- [25] 王晓杰, 刘海云, 贾登云, 等. ZTA陶瓷颗粒增强高铬铸铁基复合材料界面组织及元素分布特征 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41 (9): 1157-1162.

Study on Interface Behavior and Wear Resistance of ZTA Particle Reinforced High Manganese Steel Matrix Composites

XU Guo-lei^{1,2}, LI Wei^{1,2}, YI Yan-liang^{1,2}, TU Xiao-hui^{1,2}

(1. Institute of Advanced Wear & Corrosion Resistant and Functional Materials, Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong, China; 2. National Joint Engineering Research Center of High Performance Metal Wear Resistant Materials Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong, China)

Abstract:

The surface of ZTA (zirconia toughened alumina) ceramic particles is uniformly adhered with Ni powder by silica sol binder, and then mixed with high manganese steel powder for compression molding. The solid preform is prepared by sintering process, and the ZTA ceramic particles reinforced high manganese steel matrix composite is prepared by casting high temperature molten steel. The microstructure and interfacial diffusion behavior of the preform and composite were analyzed by OM, SEM and XRD. The results show that the wetting angle between metal and ceramic after adding 15% Ni to high manganese steel θ from 104.7° to 46.5°, the interface state changes from non-wetting to wetting. Ni and Fe dissolve each other to form FeNi solid solution, which reduces the surface energy of Fe, and Fe, Mn, Ni diffuse into ceramics. With the increase of Ni content in the preform, the matrix structure and interface defects of the preform are significantly reduced, and the hardness is significantly increased. The matrix hardness of 15% Ni preform is 30.3% higher than that of no Ni preform. The three body wear resistance of Ni modified ZTA reinforced high manganese steel matrix composite is much better than that of ordinary high manganese steel, with an increase of 170%.

Key words:

ZTA; wettability; element diffusion; high manganese steel; metal/ceramic interface